



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE CALEFACCIÓN GEOTÉRMICA
DISTRITAL MEDIANTE LA REHABILITACIÓN DE POZOS PETROLEROS CON
APLICACIÓN EN PUNTA DELGADA, REGIÓN DE MAGALLANES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

EMIL STEFANI SIGNORIO

PROFESOR GUÍA:
DIEGO MORATA CÉSPEDES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
LISANDRO ROJAS GALLIANI
MAURICIO MUÑOZ MORALES

Este trabajo ha sido financiado por el Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA).
Proyecto FONDAP CONICYT 15090013

SANTIAGO DE CHILE
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geólogo
POR: Emil Stefani Signorio
FECHA: 13 de julio del 2017
PROFESOR GUÍA: Diego Morata Céspedes

**METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE CALEFACCIÓN GEOTÉRMICA
DISTRITAL MEDIANTE LA REHABILITACIÓN DE POZOS PETROLEROS CON
APLICACIÓN EN PUNTA DELGADA, REGIÓN DE MAGALLANES**

La energía geotérmica se presenta como una buena solución frente a los problemas que enfrenta la industria energética y de climatización de espacios hoy en día, entre los cuales destaca la contaminación y el factor de planta. Sin embargo, muchas veces la perforación de los pozos supone costos muy elevados, imposibilitando este tipo de proyectos. Es por esto que en las últimas décadas se ha considerado rehabilitar pozos de gas y petróleo abandonados como pozos geotérmicos, ahorrándose de esta manera los costos asociados a la perforación.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología que permita cuantificar de manera sencilla el potencial energético extraíble a partir de la rehabilitación de un pozo petrolero abandonado. En este trabajo se considera la rehabilitación de pozos petroleros como intercambiadores de calor verticales cerrados coaxiales.

La metodología aquí descrita considera los siguientes pasos: en primer lugar se realiza una preselección de los pozos candidatos según su distancia al poblado o lugar de interés, luego se recolecta la información de pozos relevante para el estudio y, finalmente, se procesan los datos mediante una herramienta analítica para determinar la energía y temperatura que se puede extraer de cada pozo. Adicionalmente, esta metodología fue puesta a prueba ocupando el poblado de Punta Delgada como ejemplo. Para ello se utilizaron los datos de los pozos petroleros pertenecientes a la Empresa Nacional del Petróleo, ubicados en Magallanes.

Aplicando esta metodología en Punta Delgada se encontró que el mejor pozo para ser rehabilitado es CHULENGO 1 el cual se ubica a 660 metros del centro del poblado. Para este pozo, se generaron dos escenarios posibles, el primero considerando menores exigencias que el segundo. En ambos casos los resultados fueron positivos, encontrándose ahorros que representan un 97,53% y un 94,97% del consumo anual total de gas destinado a la climatización de espacios de Punta Delgada.

Considerando que el gradiente geotermal promedio para la cuenca de Magallanes es de 0,049 [°C/m] y que contiene más de 1400 pozos petroleros en estado de abandono, se postula que este trabajo puede ser replicado en poblados similares, como por ejemplo Cerro Sombrero.

Agradecimientos

Agradezco al proyecto FONDAP/CONICYT N°15090013 (Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, CEGA) y a la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) por proveer el espacio de trabajo y proveer los datos necesarios para el desarrollo de esta memoria de título.

Agradezco también a los integrantes de la comisión, Diego Morata, Lisandro Rojas y Mauricio Muñoz por su apoyo, confianza y guía. A Diego Morata por su guía, pero también por haberme dado la oportunidad de trabajar en geotermia. A Lisandro Rojas por la buena disposición con respecto a la entrega de los datos y las ganas de impulsar la geotermia en Magallanes. Finalmente, a Mauricio Muñoz por su amabilidad y disponibilidad a lo largo de todo el trabajo de título, respondiendo a todas mis inquietudes de buena manera y siempre dispuesto a poner sus conocimientos a disposición de este trabajo. Adicionalmente quiero agradecer a Diego Aravena y Nicolás Hurtado por toda la ayuda que me brindaron a lo largo de este proceso.

Por otro lado, deseo transmitir mi gratitud hacia todo el personal que trabaja en la facultad, en particular en el departamento de geología. Aquellos que llegan temprano en la mañana para que los alumnos y profesores disfrutemos de espacios limpios y ordenados. También aquellos que sirven de guía a los alumnos, en esta categoría me gustaría destacar mis agradecimientos a Blanca Baccola. He conocido pocas personas que trabajen con tal dedicación y la considero, sin lugar a dudas, un ejemplo a seguir.

En el ámbito familiar me gustaría agradecer a mis hermanas por haber actuado siempre como un punto de referencia, tanto en lo profesional como en lo personal. A Mercedes y Adriana por haber aportado tanto en mi crianza. También a mi primo Jorge, por haber crecido juntos y juntos también haber desarrollado la curiosidad por el mundo natural. A Catalina, por el apoyo y cariño que me ha entregado, tanto en este trabajo como en otros muchos otros ámbitos. A mi tío, y ahora colega, Ernesto Pérez, por aquellas salidas al cajón del Maipo en búsqueda de fósiles y por haberme hecho soñar con dinosaurios. Finalmente quiero agradecer a mi madre, sin la cual quizás nunca habría decantado por estudiar geología ya que fue su capacidad de interpretación la que le permitió comprenderme mejor que nadie y entender mis necesidades, aun cuando yo mismo no las entendía. Me faltarían páginas para expresar mi gratitud y amor hacia ti por todo lo que has hecho por mí.

No esta demás agradecer a todos los amigos que hicieron de los tiempos universitarios unos más agradables. Los cabros de geo, los electricabros, los cabros de la alianza, a todos ellos infinitas gracias por los ya largos años de amistad. Estoy feliz de haber recorrido con ustedes este camino del cual tengo los mejores recuerdos.

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Formulación del estudio propuesto	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivos generales	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Hipótesis	3
1.4 Metodología.....	3
1.4.1 Recurso geotérmico disponible: base de datos de ENAP	3
1.4.2 Selección de pozos	3
1.4.3 Herramienta numérica	3
1.4.4 Identificación de los pozos de interés	3
1.5 Ubicación y vías de acceso	3
CAPITULO 2. MARCO GEOLÓGICO	5
2.1 Marco geológico regional.....	5
2.2 Marco geológico local	10
2.2.1 Estratigrafía	10
2.2.2 Pali Aike como posible fuente de calor	14
2.2.3 Estructuras.....	14
CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO.....	16
3.1 Rehabilitación de pozos petroleros para uso geotérmico	16
3.1.1 Aspectos generales	16
3.1.2 Modelo de transferencia de calor	18
3.2 Distribución de calor distrital	20
3.2.1 Aspectos generales	20
3.2.2 Componentes de un sistema de calefacción distrital	21
3.2.3 Temperaturas en red de distribución	22
CAPITULO 4. ANTECEDENTES PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO EXTRAÍBLE.....	25
4.1 Corrección de la temperatura	25
4.2 Funcionamiento de la herramienta analítica para el cálculo de temperaturas	25
4.2.1 Aspectos técnicos	25
4.2.2 Aspectos teóricos.....	28

4.3 Cálculo de demandas térmicas	29
4.3.1 Cargas térmicas y balance energético de la vivienda	29
4.3.2 Demanda y consumo energético.....	31
4.4 Conductividad termal según litología	34
CAPITULO 5. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO EXTRAÍBLE.....	36
5.1 Selección preliminar de pozos	36
5.2 Base de datos.....	36
5.3 Cálculo de temperaturas	37
5.4 Selección de pozos definitivos.....	37
CAPITULO 6. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO EXTRAIBLE EN PUNTA DELGADA, MAGALLANES.....	38
6.1 Selección preliminar de pozos	38
6.2 Base de datos.....	40
6.3 Cálculo de temperaturas	42
6.3.1 Determinación de valores de los parámetros	42
6.3.2 Temperaturas y energía extraíbles de los pozos aledaños a Punta Delgada	43
6.4 Selección pozos definitivos.....	43
6.5 Análisis en detalle del pozo seleccionado	45
6.5.1 Rendimiento mensual con 5 [°C] adicionales	45
6.5.2 Consumo de gas con 5 [°C] adicionales	47
6.5.3 Rendimiento mensual con 10 [°C] adicionales	48
6.5.4 Consumo de gas con 10 [°C] adicionales	49
CAPITULO 7. DISCUSIONES.....	50
7.1 Análisis de la metodología	50
7.1.1 Distancia de los pozos preseleccionados	50
7.1.2 Perfil de temperatura	50
7.1.3 Temperatura de entrada	51
7.1.4 Fluidos circulantes en profundidad	51
7.1.5 Estado de los pozos.....	52
7.2 Análisis de sensibilidad de la herramienta analítica.....	52
7.3 Limitaciones del modelo	53
7.3.1 Radio de influencia térmico del pozo	53

7.3.2 Pérdida de calor en la sección interior.....	54
CAPITULO 8. CONCLUSIONES.....	55
BIBLIOGRAFIA.....	56
ANEXOS.....	59
ANEXO A: ENTRADAS HOJA DE CÁLCULO.....	59
ANEXO B: BASE DE DATOS.....	63

Índice de figuras

Figura 1.1: Imagen satelital mostrando el poblado de Punta Delgada y en puntos rojos los pozos pertenecientes a la ENAP (WGS84, 19S).	2
Figura 1.2: Ubicación y vía de acceso a Punta Delgada. Tomado y modificado de <i>Google Maps</i> . 4	
Figura 1.3: Imagen satelital mostrando el poblado de Punta Delgada, Punta Arenas, el Campo Volcánico de Pali Aike (CVPA) y la zona de estudio (recuadro celeste).	5
Figura 2.1: Configuración esquemática de las placas en la zona austral de Sudamérica. Se puede observar la ubicación del perfil mostrado en la Figura 2.3 (línea roja), las lavas Patagónicas tipo Plateau del Cenozoico (áreas verdes), el espesor en kilómetros del relleno sedimentario de la Cuenca de Magallanes (línea roja discontinua) y su límite aproximado (línea celeste). Modificado de Ross et al. (2011).	6
Figura 2.2: Evolución tectónica de la Cuenca de Magallanes. Entre los 174 Ma y los 113 Ma (esquemas a, b y c) se llevaron a cabo las fases extensivas producto de la ruptura de Gondwana mientras que entre los 113 Ma y los 2.5 Ma (esquemas d, e y f) ocurrieron los periodos compresivos producto de la apertura del océano Atlántico. En el esquema f es posible observar la ubicación aproximada del perfil A-A' de la Figura 2.3 (flechas rojas). Modificada de Sáez (2017).	7
Figura 2.3: Perfil A-A'. Megasecuencias de la Cuenca Magallanes interpretadas sobre líneas sísmicas en tiempo. Ubicación: ver Figura 2.1. Modificado de Mpodozis et al. (2011).	9
Figura 2.4: Columna estratigráfica mostrando la configuración encontrada en la zona de estudio. Incluye descripciones litológicas así como las fases tectónicas correspondientes. Modificada de Sáez (2017).	13
Figura 2.5: a) Diagrama de roseta para los lineamientos. b) Diagrama de roseta para los lineamientos ponderado según el largo del lineamiento. Tomado de Mazzarini & D'Orazio (2003).	15
Figura 2.6: Imagen satelital del CVPA mostrando en amarillo algunos lineamientos NW-SE de conos volcánicos.	15
Figura 3.1: Perfil esquemático del pozo mostrando las instalaciones y el flujo del fluido (flechas), con el pozo siendo utilizado como intercambiador de calor vertical. El recuadro rojo representa la ubicación aproximada de la Figura 3.2. Modificado de Bu et al. (2012).	17
Figura 3.2: Perfil esquemático del pozo mostrando la dirección del flujo (flechas negras), los lugares donde ocurre intercambio de calor (flechas rojas) y los distintos parámetros termodinámicos y físicos de cada material.	20
Figura 3.3: Diagrama de un sistema de calefacción distrital básico. Es posible observar las cuatro partes principales que componen a un sistema de distribución distrital, las cuales son: la central generadora, la red de distribución, subestaciones y el sistema doméstico.	21
Figura 3.4: Posibles configuraciones de la red de distribución. Modificado de Valtinke (2016). 22	
Figura 3.5: Temperatura en las tuberías de ida (hacia las edificaciones) y en las tuberías de vuelta (hacia la central generadora de calor) según la temperatura del ambiente. Modificado de Recknagel et al. (2009).	23

Figura 3.6: Esquema del pozo rehabilitado, parte de la red de distribución del sistema de calefacción distrital y el intercambiador de calor que los conecta.	24
Figura 4.1: Distintas secciones de la hoja de cálculos. El usuario solo debe ingresar datos en la sección azul, las otras dos secciones son completadas automáticamente.....	26
Figura 4.2: Sección de entrada de datos de la hoja de cálculo. Se pueden apreciar la totalidad de los parámetros que demanda la planilla al usuario para poder calcular la temperatura de salida del fluido.....	27
Figura 4.3: Distintos componentes que afectan el cálculo de las cargas y ganancias térmicas. Tomado de Bustamante (2009).....	30
Figura 4.4: Conductividad termal según los distintos tipos de litologías. Tomado de Zoth & Haenel (1988).	35
Figura 6.1: Mapa de la zona de estudio mostrando en naranja un círculo de 7 kilómetros de diámetro con su centro ubicado en el poblado de Punta Delgada. Los puntos rojos corresponden a pozos con sus respectivos nombres (WGS84, 19S).	39
Figura 6.2: Rendimientos de los pozos seleccionados para el mes con las temperaturas más bajas, junio, según el caudal. La barra en color amarillo indica todos aquellos caudales para los cuales el fluido sale al menos a 85 [°C], la barra en color rojo los caudales para los cuales se generan al menos 230.450 [kWh/mes] y la barra en naranja aquellos caudales para los cuales se cumplen ambos requisitos de manera simultánea.	44
Figura 6.3: Rendimientos del pozo CHULENGO 1 según el caudal para los 12 meses del año. Se puede observar que el único periodo donde no es posible satisfacer la temperatura requerida y la demanda energética de manera simultánea es durante el mes de junio. Adicionalmente, caudales inferiores a 0,57 [kg/s] inducen al fluido a abandonar el estado turbulento por lo que no son factibles y por ende no son graficados.....	47
Figura 6.4: Rendimientos del pozo CHULENGO 1 según el caudal para los 12 meses del año. Se puede observar que el solamente durante junio y julio no es posible satisfacer la temperatura requerida y la demanda energética de manera simultánea. Adicionalmente, caudales inferiores a 0,57 [kg/s] inducen al fluido a abandonar el estado turbulento por lo que no son factibles y por ende no son graficados.	49
Figura 7.1: Cambio de temperatura del fluido descendente en el pozo CHULENGO 1. El punto rojo representa la profundidad a partir de la cual la temperatura del fluido comienza subir. Corresponde a una temperatura de 31,3 [°C] y una profundidad de 762 [m].....	51

Índice de tablas

Tabla 4.1: Cargas máximas de calefacción y demanda energética de calefacción anual para distintas ciudades. Modificado de Ortega (2017).	32
Tabla 4.2: Meses en que es necesario calefaccionar (indicados por la letra C) y en que es necesario refrigerar (indicados por la letra R), según la ciudad. Tomado de Ortega (2017).	32
Tabla 4.3: Demanda energética por temporada y ciudad. Tomado de Ortega (2017).	33
Tabla 4.4: Demanda energética según el mes para el poblado de Punta Delgada. Se puede apreciar también la temperatura media mes a mes.	34
Tabla 5.1: Ejemplo de relleno de la base de datos. En ella se puede observar los distintos parámetros necesarios para el cálculo de temperaturas.	37
Tabla 6.1: Base datos de los pozos preseleccionados. En la categoría “TIEMPO DESDE CIRCULACIÓN” y “TEMPERATURA CORRECCIÓN SIMPLE” algunos de los valores están en color naranja y otros en verde. Aquellos en naranja indican que no se tiene certeza de esta medición mientras que para los verdes el dato es certero.....	41
Tabla 6.2: Caudales para cada pozo. En la columna de la izquierda se tiene el caudal necesario para alcanzar la demanda energética de Punta Delgada durante el mes de junio (230.450 [kWh/mes]) mientras que en la columna derecha se muestra el caudal para alcanzar la temperatura requerida en la red de distribución (85[°C]).	43
Tabla 6.3: Temperatura necesaria en la salida del pozo considerando 5 [°C] adicionales, temperatura de entrada al pozo y demanda energética para cada mes del año.	45
Tabla 6.4: Caudales necesarios según el mes para el pozo CHULENGO 1 considerando 5 [°C] adicionales. En la columna izquierda se tiene el caudal necesario para alcanzar la demanda energética mientras que en la columna derecha los caudales necesarios para alcanzar la temperatura requerida.	46
Tabla 6.5: Temperatura necesaria en la salida del pozo considerando 10 [°C] adicionales, temperatura de entrada al pozo y demanda energética para cada mes del año.	48
Tabla 6.6: Caudales necesarios según el mes para el pozo CHULENGO 1 considerando 10 [°C] adicionales. En la columna izquierda se tiene el caudal necesario para alcanzar la demanda energética mientras que en la columna derecha los caudales necesarios para alcanzar la temperatura requerida.	48
Tabla 7.1: Valores promedio de los 31 pozos encontrados a menos de 10 kilómetros de Punta Delgada. La segunda fila muestra estos mismos valores con un aumento del 20%.	52
Tabla 7.2: Resultados del análisis de sensibilidad para distintos parámetros. Las cifras en verde indican aumentos mientras que aquellas en rojo indican disminuciones.	53

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Formulación del estudio propuesto

La energía geotérmica es aquella que se encuentra disponible en forma de calor al interior de nuestro planeta. Al ser capaces de extraer este calor de forma controlada es posible generar electricidad a partir de él o bien utilizar este calor directamente en calefacción y procesos productivos. En particular para calefacción, se pueden implementar soluciones tanto individuales como distritales. Por otro lado, los procesos productivos que mejor se adecuan a la geotermia son aquellos que requieren una temperatura constante, esto debido a la estabilidad de la temperatura de la tierra. Lamentablemente los elevados costos que suponen la perforación de los pozos para recuperar el recurso muchas veces imposibilitan proyectos de este tipo. Es por este motivo que en las últimas décadas se ha comenzado a considerar la rehabilitación de pozos petroleros abandonados, los cuales generalmente son lo suficientemente profundos para llegar a temperaturas que permiten entregar calor a sistemas de calefacción o procesos productivos (e.g. Huabei, China). Cabe destacar que el número de pozos petroleros en abandono va en alza y muchos de ellos se ubican en zonas con gradientes geotermiales lo suficientemente elevados como para ser explotados (Wang et al., 2016).

Actualmente en la región de Magallanes, los poblados y ciudades llevan a cabo la climatización de hogares y edificaciones en base a gas natural. Este método de calefacción es menos contaminante que la quema de leña, sin embargo no es un recurso renovable y eventualmente se verá agotado. Implica además el transporte del gas a través de una compleja red de gaseoductos hacia las zonas de entrega. Debido a estas problemáticas hay cabida para un sistema de calefacción no contaminante y sustentable que pueda reemplazar al gas.

En el presente informe se propone como solución rehabilitar antiguos pozos petroleros como pozos geotérmicos con el fin de suplir la demanda térmica de los poblados de Magallanes. Para ello se sugiere un sistema donde el pozo es sellado en profundidad y se utiliza como un intercambiador de calor vertical cerrado coaxial. Un fluido inyectado desciende a través de la sección exterior del pozo, la cual corresponde al espacio que se genera entre la tubería de revestimiento del pozo y una tubería concéntrica de menor diámetro. Una vez que el fluido llega al fondo del pozo, se revierte el sentido y comienza a ascender a través de la tubería interior. Debido a que la región de Magallanes se emplaza en la Cuenca de Magallanes, la cual ha sido explotada por sus hidrocarburos a partir de la segunda mitad del siglo XX, podemos encontrar más de 3.600 pozos en la zona de los cuales más de 1.400 están en estado de abandono. Se estima además que la energía provista por uno de estos pozos alcanzará para más de una vivienda a la vez, por lo que se propone una distribución de calor distrital.

Al momento de realizar el estudio de factibilidad técnica para proyectos de este tipo surgen varias complicaciones, entre ellas el cálculo de calor extraíble de un intercambiador. Por lo tanto, para facilitar futuros análisis de factibilidad se desarrollará una metodología que permita determinar de manera sencilla la posibilidad de llevar a cabo un proyecto de este tipo. Esta metodología incluirá una herramienta analítica que permita el cálculo de temperatura del fluido en la salida del pozo y por lo tanto de la energía recuperada.

Se espera poder calcular el calor extraíble a partir de los intercambiadores de calor. Finalmente, se aplicará la metodología creada utilizando para ello los datos de los pozos entregados por la

Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) en la localidad de Punta Delgada (Figura 1.1). Este último es un poblado ubicado en la región de Magallanes que cuenta con 186 habitantes según el censo del año 2002.

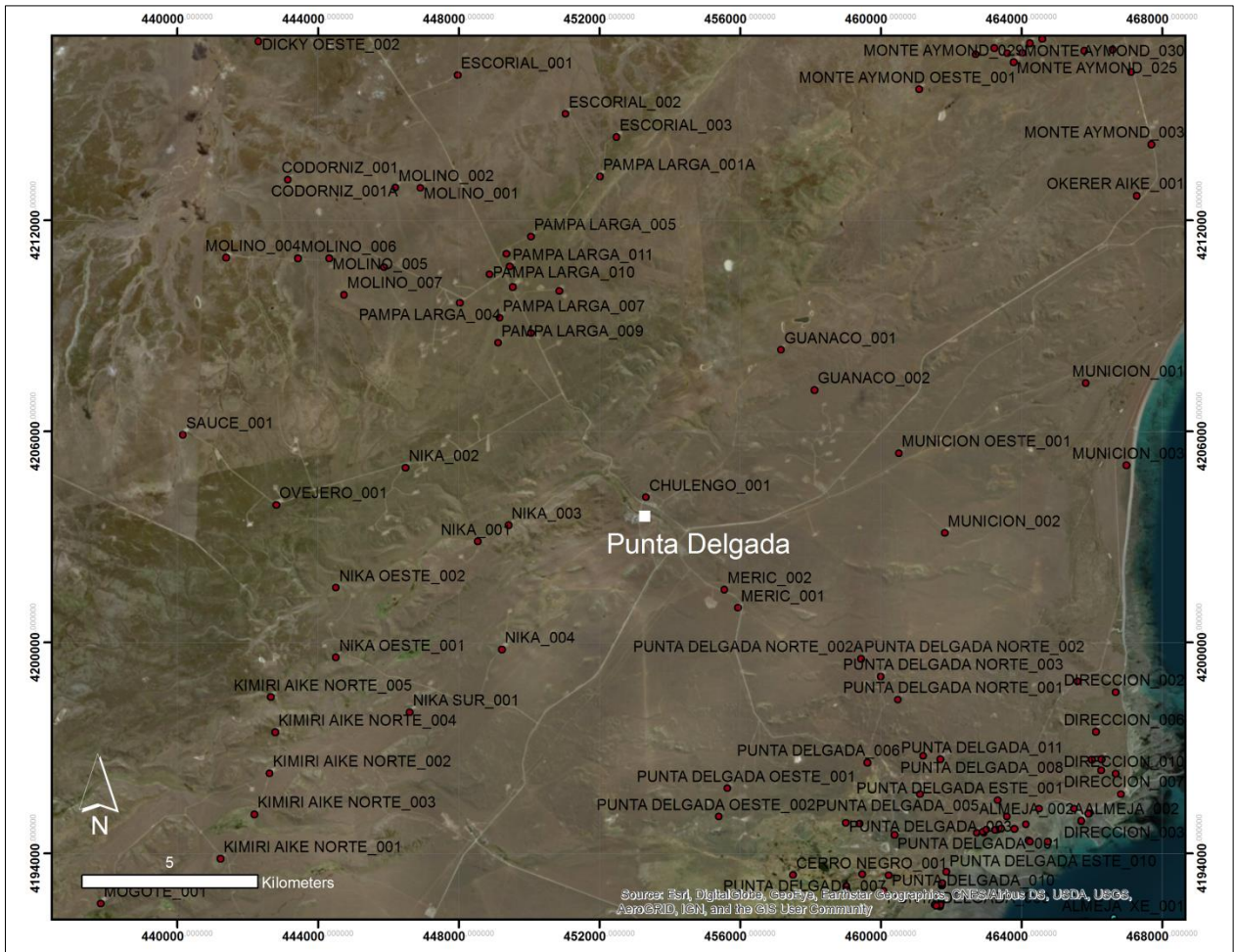


Figura 1.1: Imagen satelital mostrando el poblado de Punta Delgada y en puntos rojos los pozos pertenecientes a la ENAP (WGS84, 19S).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos generales

- Determinar la factibilidad técnica de suplir la demanda de calefacción a partir de pozos abandonados de exploración y producción en Magallanes, con un caso de estudio en Punta Delgada.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar una metodología que permita cuantificar el potencial energético extraíble a partir de la rehabilitación de pozos petroleros abandonados
- Establecer la demanda energética térmica en Punta Delgada
- Identificar los pozos que reúnan las mejores condiciones para la implementación de un sistema de calefacción distrital geotérmica en Punta Delgada de acuerdo a la energía

disponible, demanda energética de Punta Delgada y la cercanía entre los pozos y el poblado.

1.3 Hipótesis

Existen pozos de producción/exploratorios abandonados que alcanzan temperaturas mayores a 70 [°C] en la base de tal manera que representan una oportunidad para extraer calor y abastecer la demanda térmica de calefacción en Punta Delgada.

1.4 Metodología

1.4.1 Recurso geotérmico disponible: base de datos de ENAP

A través de la compilación de datos de la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) se creará una base de datos la cual contará con información sobre las propiedades de los pozos necesarias para el cálculo del potencial energético extraíble: diámetro de la tubería, temperatura en profundidad, largo del pozo, estado actual del pozo, estratigrafía y ubicación.

1.4.2 Selección de pozos

Considerando la distancia de los pozos al poblado de Punta Delgada y asumiendo que los pozos abandonados están abiertos, se seleccionaran los mejores candidatos para extraer el calor de la tierra con propósitos de calefacción distrital.

1.4.3 Herramienta numérica

El sistema de captación de calor modelado en este trabajo consiste en pozos petroleros rehabilitados como intercambiadores de calor verticales cerrados. En base a esto, se creará una hoja de cálculo, la cual mediante una solución analítica calculará la temperatura de salida de un fluido calo-portador (agua) en función de las propiedades térmicas de las rocas que rodean al pozo, sus características de construcción y el caudal de agua fluyendo al interior del intercambiador de calor coaxial. Dentro de las características de construcción del pozo, destacan la profundidad del mismo y su diámetro. Las ecuaciones de transferencia de calor se basan en la conducción de calor desde las rocas hacia el pozo por lo que consideran parámetros como la conductividad termal de las rocas y del fluido que viaja dentro del pozo, área de contacto entre la roca y el revestimiento del pozo, régimen de flujo, entre otros. Cabe mencionar que no se considera transferencia de calor por posibles flujos de agua alrededor del pozo.

1.4.4 Identificación de los pozos de interés

Utilizando la hoja de cálculo en Excel se calculará el calor extraíble de los pozos que fueron previamente seleccionados. De esta manera se podrá determinar la factibilidad técnica para llevar a cabo un proyecto de este tipo en Punta Delgada.

1.5 Ubicación y vías de acceso

El área de estudio corresponde al poblado de Punta Delgada y sus alrededores, la cual se ubica entre los 69°51'W y los 69°26'W y entre los 52°14'S y los 52°23'S, aproximadamente 125

kilómetros al noreste de Punta Arenas. Punta Delgada es un pequeño poblado chileno con 186 habitantes según el censo del año 2002 y que además actúa como base para un regimiento militar.

Desde Punta Arenas se debe tomar la ruta CH-9 hacia el norte y continuar por ella aproximadamente 4 kilómetros. Inmediatamente después de pasar la laguna Cabeza de Mar, se debe virar a la derecha para tomar la ruta CH-255 hacia el noreste y continuar por esta 157 kilómetros. Finalmente, se debe tomar la salida hacia la izquierda que da a Punta Delgada y continuar por esta 1.6 km hasta llegar al poblado (Figura 1.2).

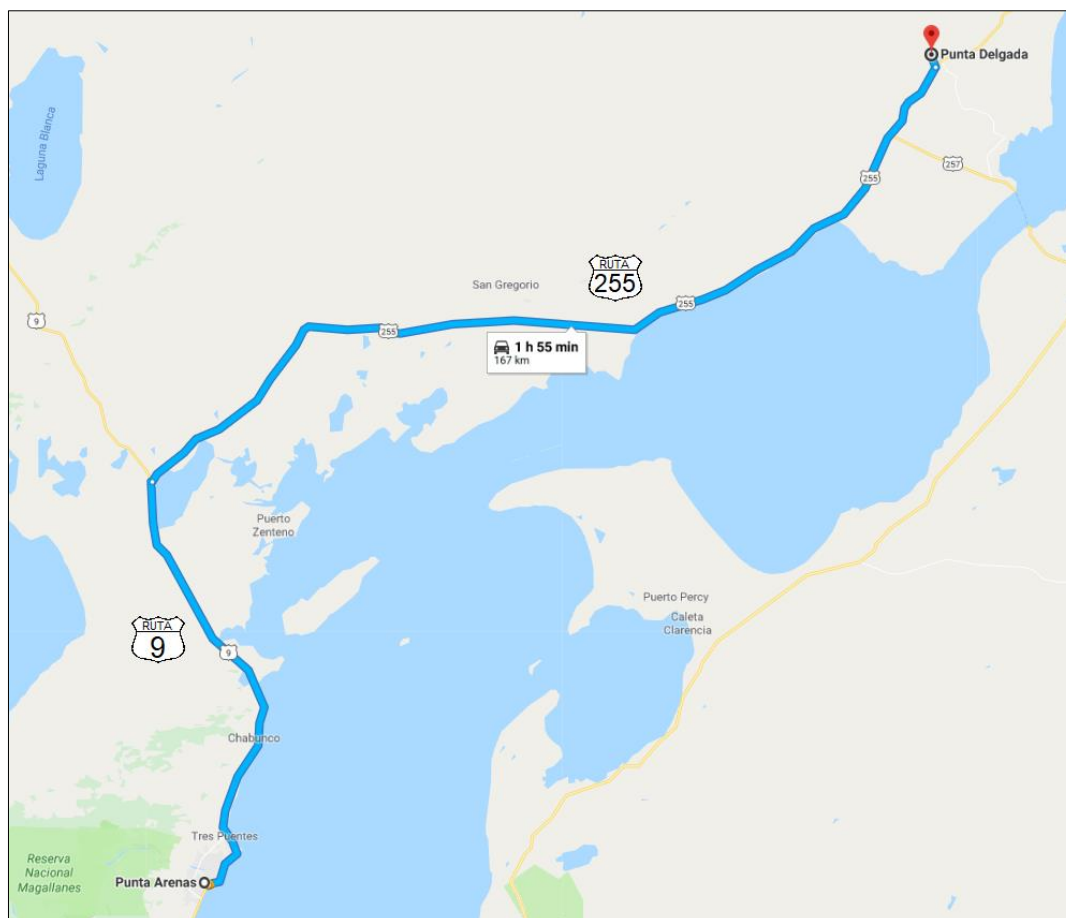


Figura 1.2: Ubicación y vía de acceso a Punta Delgada. Tomado y modificado de *Google Maps*.

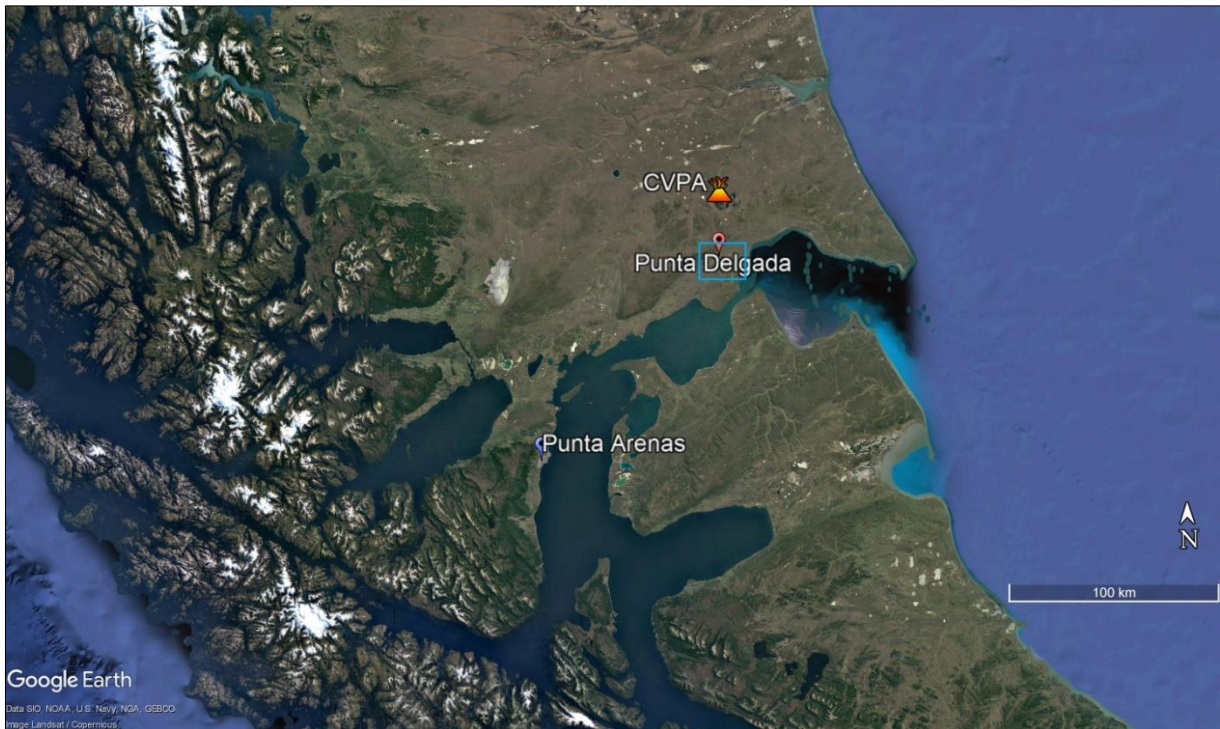


Figura 1.3: Imagen satelital mostrando el poblado de Punta Delgada, Punta Arenas, el Campo Volcánico de Pali Aike (CVPA) y la zona de estudio (recuadro celeste).

CAPITULO 2. MARCO GEOLÓGICO

2.1 Marco geológico regional

El poblado de Punta Delgada se emplaza sobre la Cuenca de Magallanes la cual se extiende entre los $\sim 49^\circ$ S y los $\sim 55^\circ$ S abarcando un área de ~ 170.000 km² y que cuenta con un espesor de hasta 8 km (Figura 2.1).

La evolución de la cuenca se divide en dos etapas (Mpodozis et al., 2011). La primera se asocia a extensión producto de la ruptura de Gondwana durante el Jurásico medio y Cretácico temprano. La segunda consiste en la formación de una cuenca de ante país hace aproximadamente 85 Ma debido a la carga tectónica en el margen occidental de la placa Sudamericana, una vez comenzada la apertura del océano Atlántico en el Aptiano (120 Ma) (Figura 2.2).

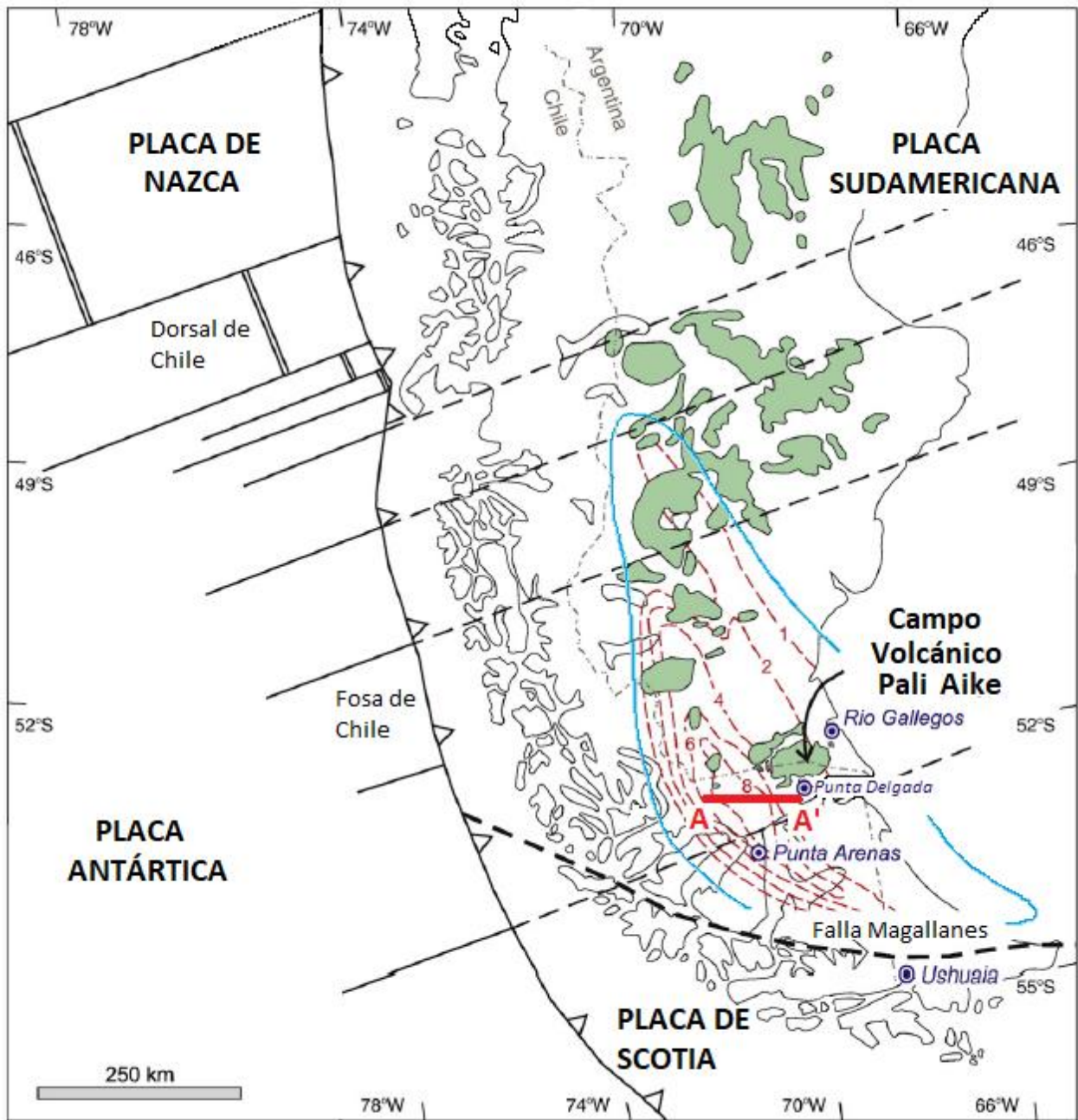


Figura 2.1: Configuración esquemática de las placas en la zona austral de Sudamérica. Se puede observar la ubicación del perfil mostrado en la Figura 2.3 (línea roja), las lavas Patagónicas tipo Plateau del Cenozoico (áreas verdes), el espesor en kilómetros del relleno sedimentario de la Cuenca de Magallanes (línea roja discontinua) y su límite aproximado (línea celeste). Modificado de Ross et al. (2011).

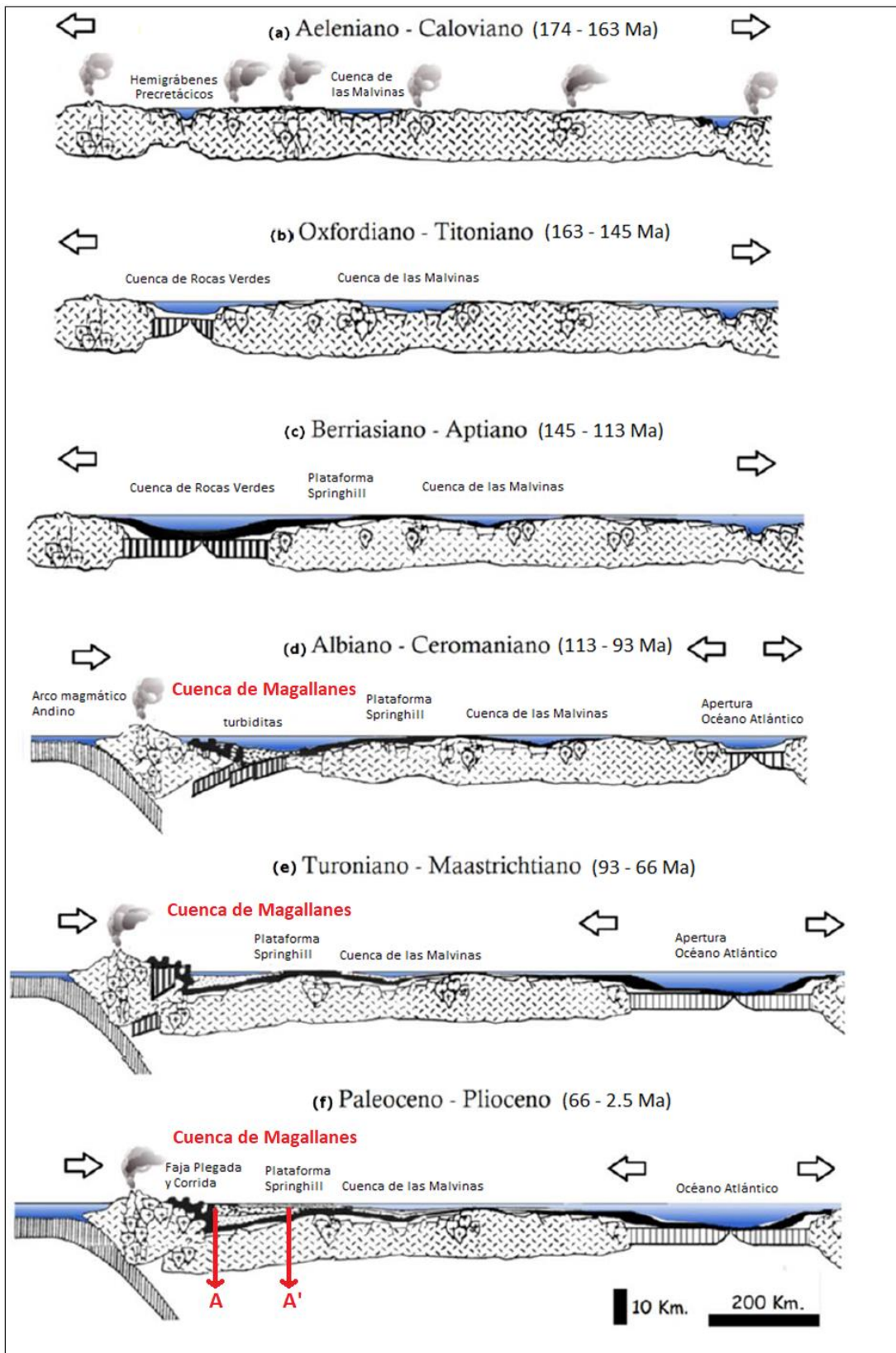


Figura 2.2: Evolución tectónica de la Cuenca de Magallanes. Entre los 174 Ma y los 113 Ma (esquemas a, b y c) se llevaron a cabo las fases extensivas producto de la ruptura de Gondwana mientras que entre los 113 Ma y los 2.5 Ma (esquemas d, e y f) ocurrieron los periodos compresivos producto de la apertura del océano Atlántico. En el esquema f es posible observar la ubicación aproximada del perfil A-A' de la Figura 2.3 (flechas rojas). Modificada de Sáez (2017).

Dentro de la cuenca se han registrado 7 megasecuencias que permiten asociar unidades depositacionales con procesos tectónicos regionales (Figura 2.3). Estas megasecuencias son, en orden decreciente de edad:

- Primera etapa, extensiva: (1) un basamento Paleozoico compuesto por rocas metamórficas; (2) megasecuencia de synrift formada durante el Jurásico y asociada a anomalías térmicas dentro del supercontinente Gondwana. Durante esta extensión se llega a formar corteza oceánica conocida como Cuenca de Rocas Verdes (CRV); (3) megasecuencia de subsidencia térmica entre el Jurásico superior y el Barremiano registrada como la continuación del synrift. Aquí se emplaza la Formación Springhill, el principal reservorio de hidrocarburos de la Cuenca de Magallanes;

- Segunda etapa, compresiva: (4) megasecuencia de antepaís 1 asociada al cierre de la CRV y que marca el inicio de la subducción de las placas “pacíficas” bajo la placa Sudamericana cerca de los 85 Ma; (5) megasecuencia de antepaís 2 depositada entre el Paleoceno y el Eoceno y caracterizada por presentar un importante incremento de espesor desde el Norte hacia el Sur; (6) megasecuencia de antepaís 3, depositada entre el Oligoceno y el Mioceno, compuesta por secuencias progradantes que luego evolucionan a agradantes; (7) megasecuencia de antepaís 4 la cual marca el inicio de la colisión de la Dorsal de Chile (límite divergente entre las placas de Nazca y Antártica) con el extremo sur de Sudamérica durante el Mioceno temprano. En esta etapa se registra un aumento del gradiente geotérmico asociado a la Dorsal de Chile que es subductada bajo la placa Sudamericana (Mpodozis et al., 2011).

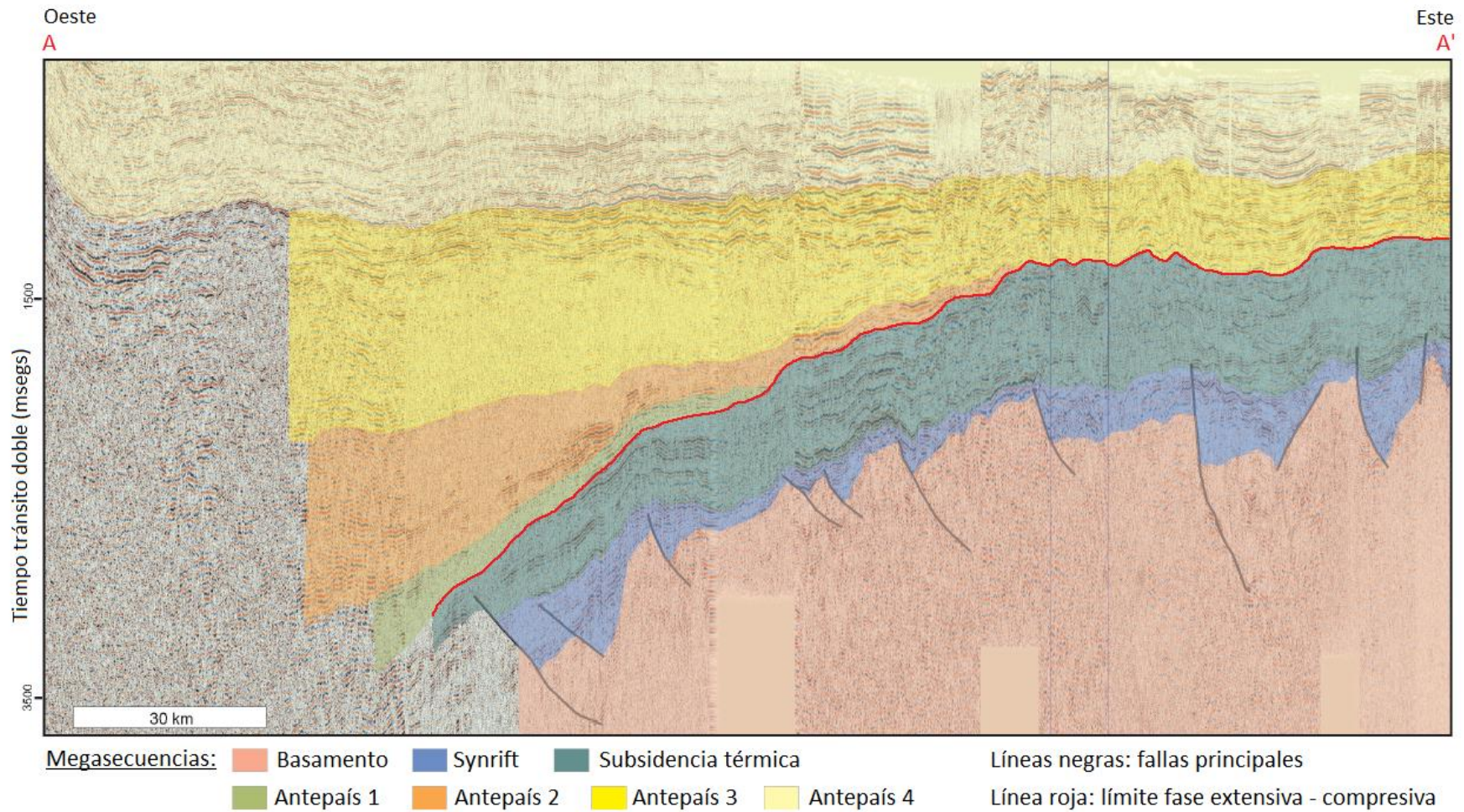


Figura 2.3: Perfil A-A'. Megasecuencias de la Cuenca Magallanes interpretadas sobre líneas sísmicas en tiempo. Ubicación: ver Figura 2.1. Modificado de Mpodozis et al. (2011).

2.2 Marco geológico local

A continuación se dará una descripción detallada de la estratigrafía encontrada en la zona de Punta Delgada. En general esta se compone por rocas sedimentarias con una marcada predominancia de lutitas, limolitas, areniscas y, en menor grado, conglomerados. Son a su vez comunes las intercalaciones de calizas y la presencia de material fósil. Las secuencias sedimentarias descritas abarcan una potencia total que ronda los 2800 metros y fueron depositadas entre el Jurásico superior y el Neógeno superior.

2.2.1 Estratigrafía

La estratigrafía presentada a continuación es la registrada por los pozos ubicados en las cercanías de Punta Delgada. La litología, la potencia de las formaciones geológicas y los contactos litológicos son, por lo tanto, los que se observan en la zona de interés y no los descritos en las localidades tipo para cada formación.

Formación Tobífera (Jurásico superior)

La Formación Tobífera (Figura 2.4), definida por Thomas (1949) y constituida por series volcánicas silíceas, principalmente tobas, representan los últimos estadios del rifting ocurrido durante el Triásico y el Jurásico. Los sondajes perforados por ENAP en la zona de estudio se detienen en este nivel por lo que no se cuenta con datos de su potencia. La Fm. Tobífera se emplaza sobre un basamento paleozoico y subyace discordantemente a la Fm. Springhill. Mediante dataciones radiométricas, se ha estimado edades que van entre los 160 y los 150 Ma (Lesla & Ferello, 1972; Gust et al., 1985).

Formación Springhill (Titoniano – Barresiano)

La Formación Springhill (Figura 2.4), está constituida por areniscas de grano grueso a fino con presencia de lutitas, limolitas y conglomerados cuarcíferos derivados de la erosión de la subyacente Fm. Tobífera. Cuenta con una potencia de aproximadamente 50 metros en la zona de estudio y se emplaza concordantemente subyaciendo a la Fm. Estratos con Favrella Steinmanni y sobreyace discordantemente a la Fm. Tobífera. El ambiente de deposición ha sido interpretado como transicional, de continental a marino somero. La base está formada por facies fluviales a estuarinas y de planicie aluvial que evolucionan a facies de planicie costera y, en el techo, a marinas someras. La Fm. Springhill es reconocida como el principal reservorio de hidrocarburos de la cuenca de Magallanes.

Formación Estratos con Favrella Steinmanni (Hauteriviano)

La Formación Estratos con Favrella Steinmanni (Figura 2.4) está constituida por lutitas con intercalaciones de calizas con una abundante presencia de amonites, particularmente *Favrella*. Tiene un espesor medio de ~100 metros y subyace a la Fm. Lutitas con Ftanita y sobreyace la Fm. Springhill mediante contactos concordantes.

Formación Lutitas con Ftanita (Barremiano – Aptiano)

La Formación Lutitas con Ftanita (Figura 2.4), está compuesta por lutitas con pintas blancas silíceas (ftanita) e intercalaciones de calizas con altos contenidos de materia orgánica. Tiene una

potencia cercana a los 170 metros, subyaciendo y sobreyaciendo concordantemente a la Fm. Margas y la Fm. Estratos con Favrella Steinmanni, respectivamente.

Formación Margas (Aptiano – Albiano)

La Formación Margas (Figura 2.4), se compone principalmente de margas grises y verdes con intercalaciones de lutitas calcáreas y calizas arcillosas. La potencia registrada por los sondajes es de aproximadamente 100 metros y se dispone subyaciendo a la Fm. Lutitas Gris Verdosas mediante una discordancia y sobreyace concordantemente a la Fm. Lutitas con Ftanita. El ambiente de depositación ha sido interpretado como marino muy somero.

Formación Lutitas Gris Verdosas (Cenomaniano – Turoniano)

La Formación Lutitas Gris Verdosas (Figura 2.4), definida por Mordojovich (1948) consiste en lutitas gris verdosas con intercalaciones de carbonatos con un número significativo de bivalvos y foraminíferos. Su potencia oscila entre los 400 y 500 metros. Subyace mediante una discordancia a la Fm. Lutitas Arenosas y sobreyace de igual manera a la Fm. Margas.

Formación Lutitas Arenosas (Coniaciano – Campaniano)

La Formación Lutitas Arenosas (Figura 2.4), definida por Mordojovich, (1951) consiste en arcillitas y lutitas con intercalaciones de carbonatos y de areniscas. Tiene una potencia cercana a los 50 metros. Sobreyace a la Fm. Lutitas Gris Verdosas y subyace a la Fm. Zona Glauconítica, con ambos contactos estando marcados por discordancias.

Formación Zona Glauconítica (Eoceno medio - Oligoceno inferior)

La Formación Zona Glauconítica (Figura 2.4), definida por Hauser (1964), está compuesta por areniscas, arcillolitas y limolitas con importantes porcentajes de glauconita. En la zona de estudio la formación en cuestión tiene una potencia aproximada de 250 metros y subyace a las formaciones del Grupo Bahía Inútil de manera concordante y sobreyace a la Fm. Lutitas Arenosas mediante una discordancia. Esta formación representa las porciones distales de unidades sedimentarias derivadas del orógeno Andino al oeste (Biddle et al., 1986).

Formaciones Puerto Nuevo y Discordia o Grupo Bahía Inútil (Eoceno medio – Oligoceno)

Las Formaciones Puerto Nuevo y Discordia o Grupo Bahía Inútil (Figura 2.4), son dos formaciones distintas, ambas hacen parte del Grupo Bahía Inútil y que en los registros de ENAP se suelen presentar agrupadas debido a sus similitudes. Por este motivo en el presente informe se las describe juntas. Ambas Formaciones fueron definidas por Barwick (1949), quien las describió litológicamente como lutitas y arcillas limosas de tonalidades gris claro con intercalaciones de bancos de calizas y areniscas. Las potencias registradas en la zona de estudio rondan los 250 metros. Subyacen a la Fm. Areniscas Arcillosas y Arcillas Arenosas mediante una discordancia y sobreyacen concordantemente a la “Zona Glauconítica”. La Fm. Puerto Nuevo tiene asignada una edad Oligocena mientras que a la Fm. Discordia se le asignó una edad Eocena media a tardía. Ambas han sido interpretadas como abanicos de talud y pisos de cuenca (Kniker, 1949; Barwick, 1949; Malumián et al., 2013).

Formación Areniscas Arcillosas o Arcillas Arenosas (Eoceno superior – Mioceno)

La Formación Areniscas Arcillosas o Arcillas Arenosas (Figura 2.4), fue definida por Mordojovich (1951) quien la describió como ciclos de areniscas de cuarzo con abundante matriz

arcillosa gradando a pelitas en la base. Tiene una potencia que oscila entre los 150 y 200 metros llegando a alcanzar 300 metros. Se dispone bajo la Fm. Brush Lake y sobreyace a la Fm. Puerto Nuevo y Discordia con ambos contactos marcados por discordancias.

Formación Brush Lake (Mioceno medio)

La Formación Brush Lake (Figura 2.4), descrita por Barwick (1949), se compone de arcillas limosas verdosas y areniscas finas a gruesas verdosas con intercalaciones de delgadas capas de areniscas y calizas muy fosilíferas hacia el techo. La potencia registrada en los sondeos es cercana a los 100 metros y no supera los 150 metros. La Fm. Brush Lake subyace concordantemente a la Fm. Filaret y sobreyace a la Fm. Areniscas Arcillosas y Arcillas Arenosas mediante una discordancia. Debido al contenido fósil, particularmente abundante en *Cassidulina sp. 1* y *sp. 4*, *Nonion sp. 4* y *Nonionella sp. 2*, así como gastrópodos (*Turritella*, *Struthiolaria*), lamelibranquios y crustáceos se le ha otorgado una edad miocena media a tardía (Kniker, 1949; Natland et al., 1974). El ambiente depositacional ha sido interpretado como un sistema prodeltaico somero donde una transgresión pudo haber depositado los niveles arcillosos (Mordojovich, 1951).

Formación Filaret (Mioceno medio – Mioceno superior)

La Formación Filaret (Figura 2.4) se compone de areniscas, areniscas conglomerádicas, conglomerados, mantos de carbón y niveles de coquinas. En gran parte de la zona de estudio este nivel no aparece y es reemplazado por el informalmente llamado nivel “Estratos con Carbón”, el cual tiene una litología similar pero destaca por su considerable abundancia en carbón. El espesor aparente de la Formación Filaret dado por los sondeos de ENAP ronda los 500 metros en la zona de estudio. Esta Formación subyace discordantemente a la Formación Palomares y sobreyace concordantemente a la Formación Brush Lake. Los abundantes foraminíferos (lamelibranquios, *Turritellas*) indican una edad miocena tardía (González, 1965). La interpretación para esta formación corresponde a una depositación bajo condiciones continentales litorales y de plataforma marina somera (González, 1965; Natland et al., 1974).

Formación Palomares (Mioceno superior – Plioceno inferior)

La Formación Palomares (Figura 2.4), definida por Keidel y Hemmer (1931), corresponde a conglomerados, tobas, brechas volcánicas y areniscas. En la zona de estudio, los sondeos realizados por ENAP indican una potencia de 270 metros aproximadamente. Se encuentra cubierta por los depósitos pleistocénicos fluvio-glaciales mediante una discordancia y sobreyace, también discordantemente, a la Fm. Filaret. En base a restos fósiles de *Nematherium birdi* y *Astrapotherium magnum* (vertebrados), se le asigna a la Formación Palomares una edad miocena tardía a pliocena temprana (González, 1953). El ambiente de depositación corresponde a un ambiente continental con sistemas depositacionales de planicie aluvial y deltaica.

Cubierta sedimentaria fluvio-glacial

La cubierta sedimentaria fluvio-glacial (Figura 2.4), está compuesta por gravas y arenas sin consolidar con intercalaciones delgadas de arcilla fina gris claro y amarillenta. El espesor de la cubierta oscila entre los 50 metros y los 150 metros según los datos recuperados en subsuelo y sobreyace a la Formación Palomares.

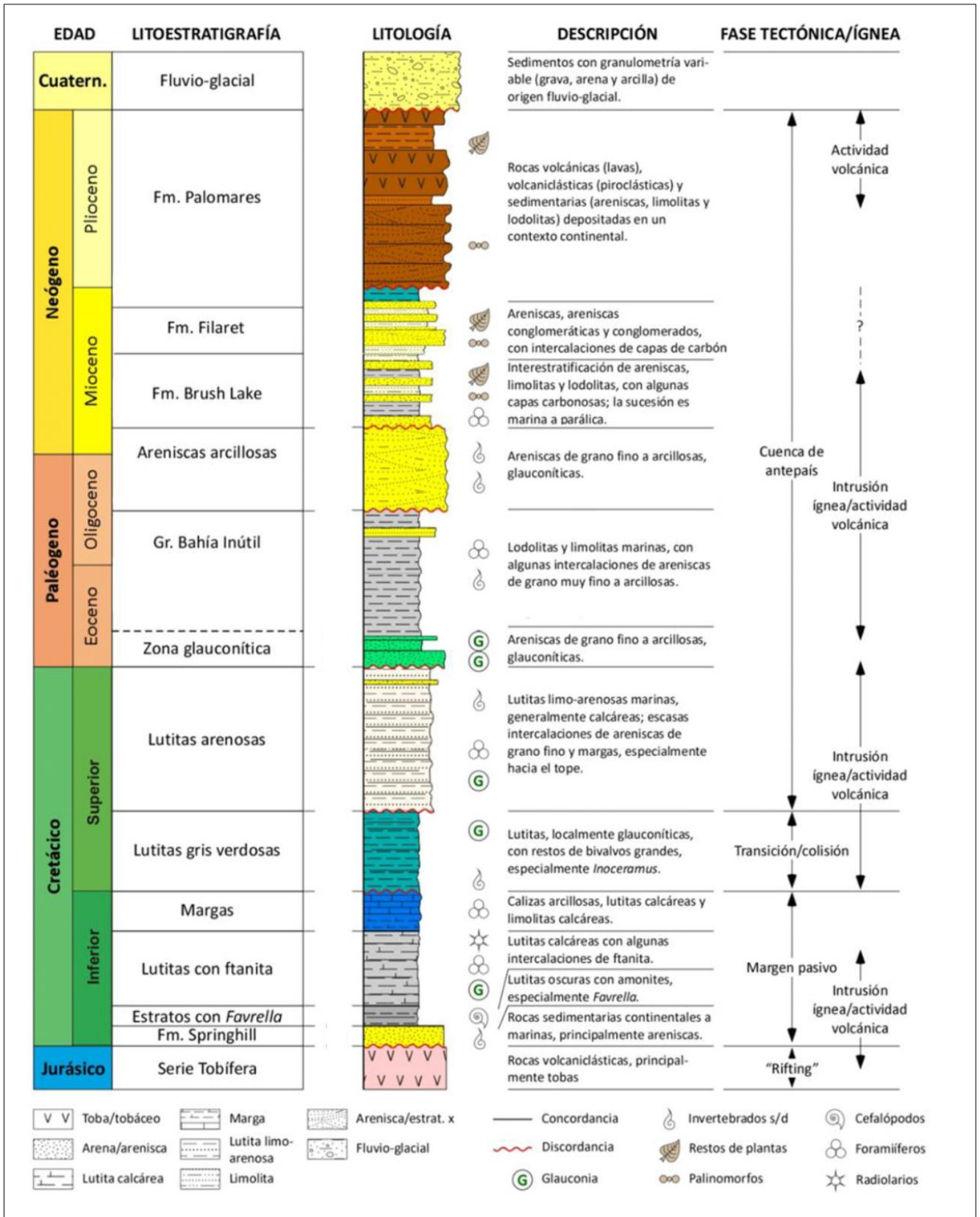


Figura 2.4: Columna estratigráfica mostrando la configuración encontrada en la zona de estudio. Incluye descripciones litológicas así como las fases tectónicas correspondientes. Modificada de Sáez (2017).

2.2.2 Pali Aike como posible fuente de calor

El Campo Volcánico Pali Aike (CVPA) cubre un área de ~4500 km² y se compone principalmente por rocas volcánicas de composición basáltica. La secuencia volcánica comienza con la efusión de extensos flujos de lava tabulares mostrando una típica morfología tipo plateau y alcanzando hasta 120 m de potencia. Gracias a los cortes producidos por las incisiones fluviales, es posible apreciar remanentes de conos de escoria, diques y sills dentro de esta secuencia volcánica (D'Orazio et al., 2000).

A pesar de la proximidad del CVPA a una importante zona de subducción, se tienen magmas que carecen completamente de la signatura geoquímica típica para magmas de este tipo. De hecho, los datos geoquímicos sugieren lavas con signaturas típicas de magmas intraplacas tipo OIB y apuntan a una fuente magmática con una profundidad superior a 80 kilómetros, evidenciado por la alta presencia de granates en algunos xenolitos. Debe existir por lo tanto algún mecanismo que permita reemplazar la cuña astenosférica contaminada por el slab por una cuña no contaminada. Se ha propuesto para este efecto un modelo de ventana astenosférica, la cual habría sido generada por la subducción de la Dorsal de Chile (D'Orazio et al., 2000).

Mediante dataciones isotópicas de K-Ar y ⁴⁰Ar/³⁹Ar se pudieron estimar edades que van desde los 3,78 Ma a los 0,17 Ma (Mercer, 1976; Linares and Gonzalez, 1989; Meglioli, 1993; Singer et al., 1997; Corbella, 1999).

Este volcanismo reciente sugiere por un lado la presencia de altas temperaturas en profundidad y, por otro, la existencia de una anomalía termal positiva de escala regional que podría tener implicancias en el desarrollo de sistemas geotermales no convencionales.

2.2.3 Estructuras

La ocurrencia de basaltos de intraplaca cuasi primarios portadores de xenolitos mantélicos en Pali Aike sugiere la existencia de sistemas de falla que conectaron reservorios magmáticos profundos con la superficie. Debido a la proximidad de Pali Aike con Punta Delgada, estas estructuras podrían repetirse en la zona de estudio y son por lo tanto de interés para este trabajo ya que actualmente podrían estar canalizando fluidos geotermales.

La distribución espacial de los conos y a su vez el elongamiento de estos ha permitido reconocer los principales sistemas de fracturas que actúan como alimentadores de magma. Estos están orientados, en orden de importancia, NW-SE, NE-SW y E-W (Figuras 2.5 y 2.6). Además, se ha encontrado una alta relación entre la elongación de los conos, los lineamientos y las fracturas, indicando que la fase tectónica que haya formado estos sistemas de fracturas fue contemporánea con la actividad volcánica del CVPA. Estos sistemas de fracturas fueron formados ya sea por reactivación de antiguas estructuras corticales (Rift Patagónico Austral del Mesozoico; Corbella et al., 1996) o formados durante el régimen extensional Neógeno (Mazzarini & D'Orazio, 2003).

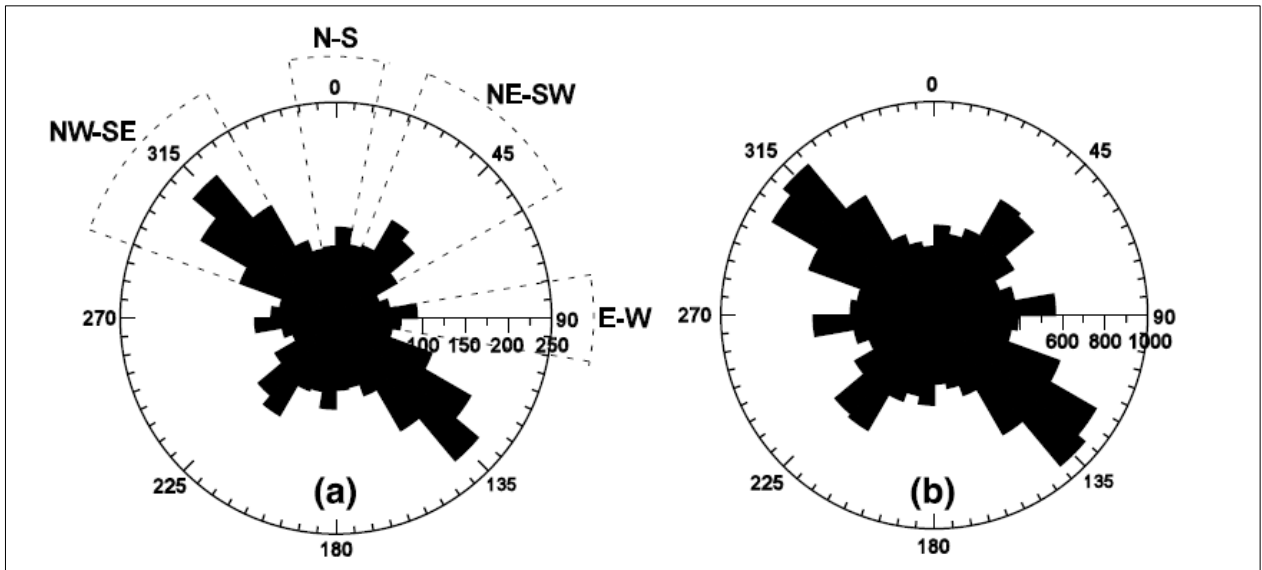


Figura 2.5: a) Diagrama de roseta para los lineamientos. b) Diagrama de roseta para los lineamientos ponderado según el largo del lineamiento. Tomado de Mazzarini & D’Orazio (2003).

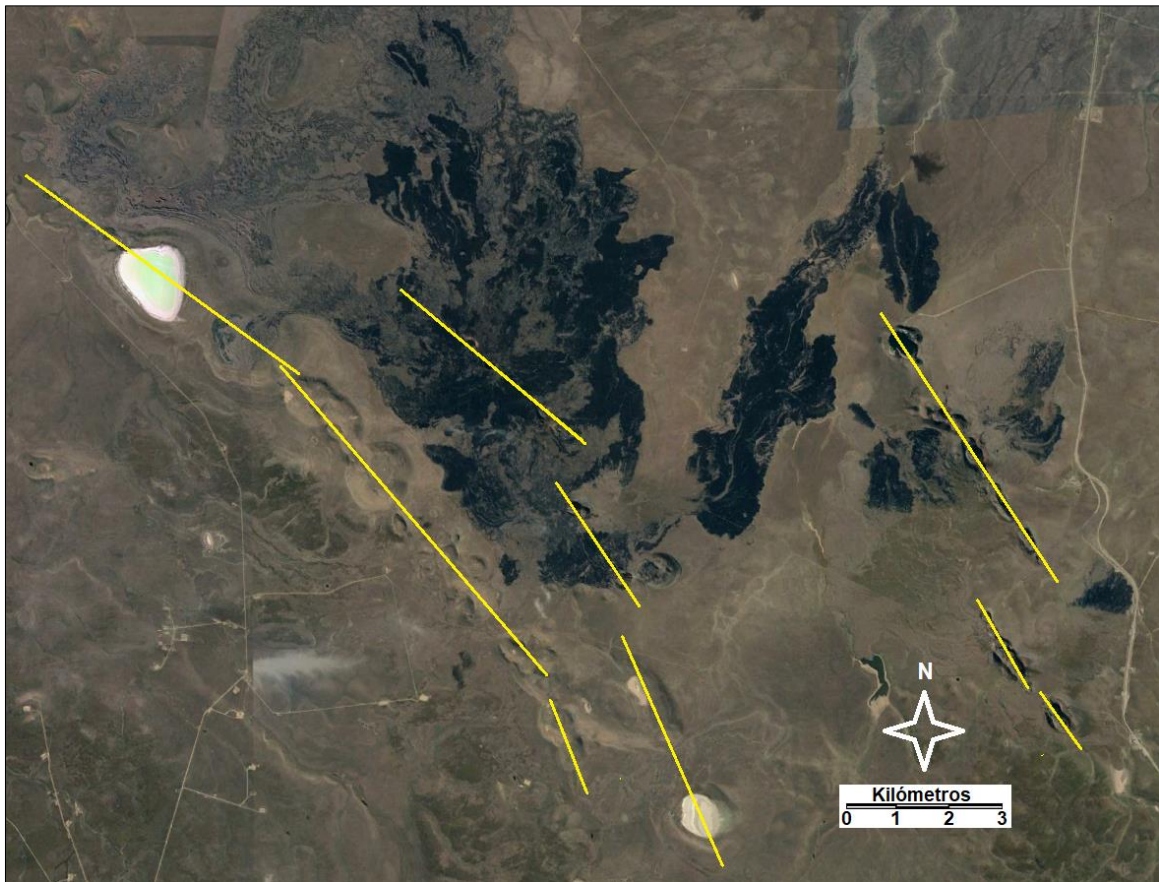


Figura 2.6: Imagen satelital del CVPA mostrando en amarillo algunos lineamientos NW-SE de conos volcánicos.

CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO

3.1 Rehabilitación de pozos petroleros para uso geotérmico

3.1.1 Aspectos generales

El sector energético global enfrenta desafíos cada vez mayores en un mundo donde la demanda continua aumentando, pero donde las políticas energéticas se alejan progresivamente de la generación basada en combustibles fósiles. Bajo este contexto, las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) proveen una solución que se ajusta a los nuevos estándares. Por otro lado, la industria del petróleo pierde competitividad cada día. Solo en California, Estados Unidos, se han estimado que hay aproximadamente 147.127 pozos en estado de abandono hasta el año 2017 (Caulk & Tomac, 2017). A su vez, la energía geotérmica tiene sus propios desafíos que dificultan su ingreso de forma masiva al mercado. La principal barrera para esto son los altos costos iniciales que suponen la instalación de una central de este tipo. Por ejemplo, en algunos proyectos, el costo de la perforación de los pozos puede ascender hasta un 50% del costo total (Bu et al., 2012) y pocas veces es inferior al 30%. En síntesis, rehabilitar pozos petroleros en abandono para uso geotérmico es una solución que trae beneficios tanto para la industria de hidrocarburos como para la geotérmica.

Existen principalmente dos maneras en las que se puede utilizar un pozo petrolero para uso geotérmico: 1) extrayendo un fluido geotermal en profundidad previamente existente 2) inyectando un fluido dentro de un sistema cerrado, el cual se calienta en profundidad y asciende nuevamente para ser explotado (Figura 3.1). En el primer caso se requiere de ciertas condiciones geológicas tales como temperaturas y tasas de producción estables y condiciones óptimas para la reinyección del fluido geotermal. Un proyecto de este tipo no difiere mucho con un proyecto geotérmico tradicional de alta entalpia. Por otro lado, el segundo se asemeja a un proyecto de baja entalpia con un pozo cerrado actuando como intercambiador de calor. Requiere por lo tanto que el pozo sea cerrado en profundidad para evitar pérdidas del fluido calo-portador.

En un sistema del segundo tipo, se hace descender el fluido que se desea calentar a través de la tubería de revestimiento del pozo (en inglés ‘casing’) y luego este mismo, una vez calentado, asciende a través de una tubería concéntrica de menor diámetro (Figura 3.1). Al extraer el calor de esta forma se evita el ingreso de fluidos geotermales al pozo, los cuales generalmente dañan las instalaciones producto de la precipitación de minerales y corrosión. Además ya no es necesaria la existencia de un fluido geotermal en profundidad por lo que se simplifica también la explotación.

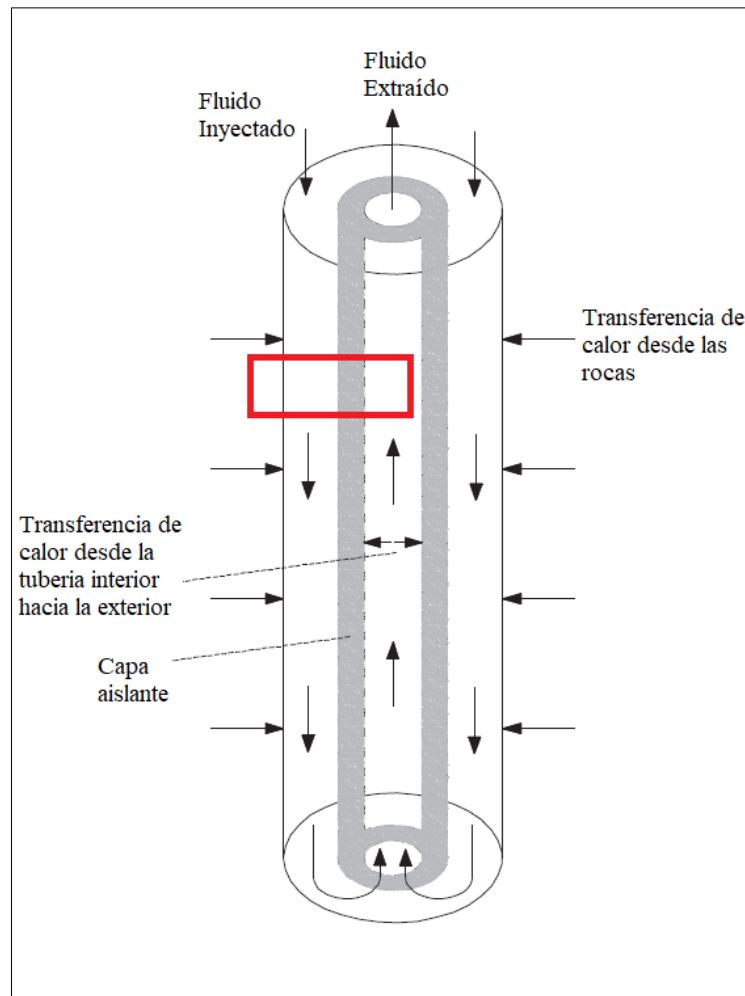


Figura 3.1: Perfil esquemático del pozo mostrando las instalaciones y el flujo del fluido (flechas), con el pozo siendo utilizado como intercambiador de calor vertical. El recuadro rojo representa la ubicación aproximada de la Figura 3.2. Modificado de Bu et al. (2012).

Algunos autores han propuesto inyectar un fluido orgánico en el pozo, como por ejemplo isobutano (Davis & Michaelides, 2009). Este fluido tiene propiedades termodinámicas que lo convierten en un mejor candidato para extraer el calor respecto del agua. A pesar de las ventajas en cuanto a rendimiento, utilizar un fluido orgánico en los pozos que actúan como intercambiadores de calor trae principalmente dos problemas: 1) se requieren enormes cantidades del fluido orgánico; 2) en caso de fuga en el pozo, estos fluidos son altamente contaminantes. Otros autores, tales como Wight y Bennett (2015) han propuesto utilizar agua, la cual si bien no cuenta con las mejores características termodinámicas, es inocua en caso de fuga y conlleva menores costos.

En base a lo expuesto recién, a partir de ahora se considerarán solamente sistemas en donde los pozos están cerrados en profundidad y actúan como intercambiadores de calor, dejando de lado la opción de rehabilitar los pozos como sistemas abiertos. Sumado a esto, el fluido que se considerará para los cálculos será agua.

3.1.2 Modelo de transferencia de calor

Para calcular la temperatura a la que saldría un fluido luego de pasar a través de un pozo se deben en primer lugar modelar los procesos de transferencia de calor que son llevados a cabo. Para ello se compilaron distintos métodos entre los cuales destacan los de Davis & Michaelides (2009), Bu, X. et al. (2012), Caulk & Tomac (2017), Kujawa, T. et al. (2006). El que se propone en este trabajo está basado en gran parte en el trabajo de Davis & Michaelides (2009) salvo por algunas modificaciones tomadas del libro *Introduction to heat transfer* (Bergman et al., 2011).

Como se puede apreciar en la Figura 3.2, existe transferencia de calor en dos partes. Una entre la roca y el fluido que baja por la sección exterior y la otra entre la sección interior y la sección exterior.

La tasa de transferencia de calor de la roca al fluido en la tubería exterior en un tramo determinado es la siguiente (Davis & Michaelides, 2009):

$$\dot{Q} = 2\pi R\Delta Z(T_r - T_{fe})U_{re} [W] \quad (3.1)$$

Donde R [m] es el radio de la tubería exterior, ΔZ [m] la distancia vertical del tramo a considerar, T_r [°C] y T_{fe} [°C] la temperatura de la roca y del fluido en la sección exterior en aquel tramo respectivamente, y U_{re} [W/m²K] el coeficiente de transferencia de calor entre la roca y la sección exterior el cual a su vez se define como (Bergman, et al, 2011). :

$$U_{re} = \left(\frac{1}{h_e} + \frac{D_r}{k_r}\right)^{-1} \left[\frac{W}{m^2K}\right] \quad (3.2)$$

Donde k_r [W/mK] es el coeficiente de transferencia de calor de la roca, D_r [m] es el diámetro más allá del cual la roca no ve su temperatura afectada y h_e es el coeficiente de transferencia de calor convectivo en la pared externa de la sección exterior:

$$h_e = 0.023k_f \frac{Re_e^{0.8} Pr^{0.4}}{d_h} \left[\frac{W}{m^2K}\right] \quad (3.3)$$

Donde k_f [W/mK] es el coeficiente de transferencia de calor del fluido, Re_e el número de Reynolds en la sección exterior, Pr el número de Prandtl y d_h [m] el diámetro hidráulico de la sección exterior:

$$d_h = 2(R - (r + t)) [m] \quad (3.4)$$

Donde r [m] es el radio de la tubería interior y t [m] el espesor de la capa aislante

Por otro lado, la tasa de transferencia de calor del fluido ascendente que viaja a través de la tubería interior hacia el fluido descendente se modela como:

$$\dot{Q} = 2\pi r\Delta Z(T_{fe} - T_{fi})U_{ei} [W] \quad (3.5)$$

Donde T_{fi} [$^{\circ}\text{C}$] es la temperatura del fluido en la sección interior y U_{ei} [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] el coeficiente global de transferencia de calor entre la sección interior y la exterior el cual a su vez se define como:

$$U_{ei} = \left(\frac{r+t}{r} \times \frac{1}{h_i} + \frac{r+t}{r+t/2} \times \frac{t}{k_a} + \frac{1}{h_e'} \right)^{-1} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \quad (3.6)$$

Donde k_a es el coeficiente de transferencia de calor del aislante, h_i el coeficiente de transferencia de calor convectivo en la sección interior y h_e' el coeficiente de transferencia de calor convectivo en la pared interior de la sección exterior:

$$h_i = 0.023k \frac{Re_i^{0.8} Pr^{0.4}}{2r} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \quad (3.7)$$

$$h_e' = 0.023k \frac{Re_e'^{0.8} Pr^{0.4}}{2(r+t)} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \quad (3.8)$$

Hasta el momento solo se han considerado ecuaciones que permiten calcular el calor transferido. Para transformar este calor en un aumento o disminución de la temperatura se debe considerar la siguiente ecuación:

$$T = \frac{\dot{Q}}{C_p \dot{m}} \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (3.9)$$

Donde C_p [J/kgK] corresponde al calor específico del fluido y \dot{m} [kg/s] al caudal.

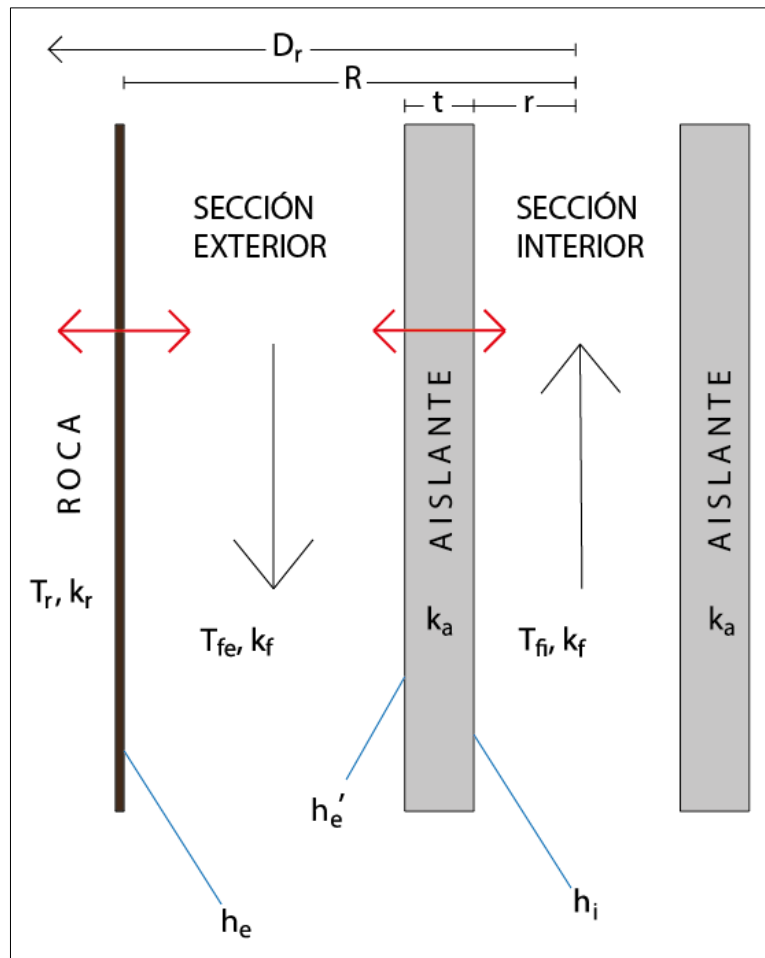


Figura 3.2: Perfil esquemático del pozo mostrando la dirección del flujo (flechas negras), los lugares donde ocurre intercambio de calor (flechas rojas) y los distintos parámetros termodinámicos y físicos de cada material.

3.2 Distribución de calor distrital

3.2.1 Aspectos generales

La calefacción distrital se define como aquella donde el calor es generado de manera centralizada para luego ser entregado a un grupo de edificaciones que lo requieran a través de un sistema de distribución. Hoy en día existen cuatro áreas en las cuales se emplea la calefacción distrital: calefacción de espacios, de aguas, procesos de enfriamiento y procesos de producción. El calor se obtiene generalmente de la quema de combustibles fósiles, sin embargo también se emplea la quema de biomasa, geotermia, energía solar y residuos de calor de procesos industriales. Debido al enfoque de este trabajo, solo se hablará de calefacción distrital geotérmica enfocada a la calefacción de espacios.

Cuando consideramos la calefacción de espacios, la cantidad de calor requerida se ve fuertemente influenciada por la temperatura exterior, el tipo y calidad de construcción y los hábitos de los residentes (Pettersen, 1994). Existe también una correlación entre demanda y horario o época del año. Durante las mañanas, tardes o fines de semana la demanda aumenta en los hogares mientras que durante el horario de oficina, entre 8 am y 6 pm, la demanda aumenta en los lugares de trabajo y disminuye en las residencias. Los meses que cuentan con las temperaturas más bajas, i.e. durante el invierno, son también aquellos que muestran las demandas más altas. Por otro lado,

la calefacción de aguas se ve menos influenciada por la temperatura ambiente que la calefacción de espacios, pero cuenta con variaciones similares durante el horario y según los distintos clientes.

3.2.2 Componentes de un sistema de calefacción distrital

Un sistema de calefacción distrital se construye a partir de cuatro partes principales (Figura 3.3): la planta generadora, una red de distribución, subestaciones de calefacción distrital y el sistema doméstico (Valtinke, S. 2016).

El agua caliente puede ser empleada de manera directa o indirecta. En la primera, el agua ocupada en el sistema doméstico es la misma que la que circula por la red de distribución. En la segunda existe una subestación entre la red de distribución y el sistema doméstico. Esta subestación controla todos los parámetros de la red secundaria y entrega el agua con las condiciones de caudal, presión y temperatura adecuadas. Las subestaciones pueden estar pensadas tanto para una edificación en particular como para un grupo de ellas.

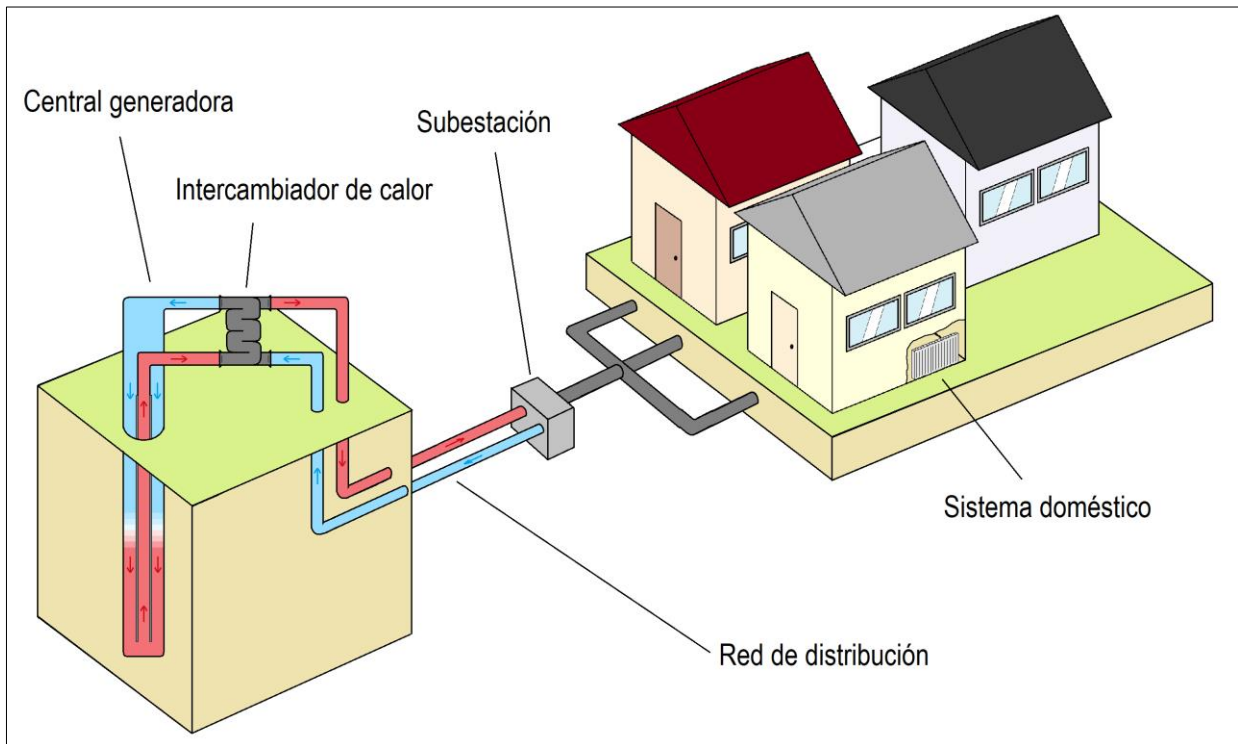


Figura 3.3: Diagrama de un sistema de calefacción distrital básico. Es posible observar las cuatro partes principales que componen a un sistema de distribución distrital, las cuales son: la central generadora, la red de distribución, subestaciones y el sistema doméstico.

Planta generadora

La planta generadora en este caso corresponde al pozo rehabilitado que actúa como intercambiador de calor vertical cerrado. Esta transmite el calor recuperado a la red de distribución mediante un intercambiador de calor.

Red de distribución

La red de distribución es generalmente un ciclo separado sin conexión directa con la planta generadora ni el sistema doméstico. A su vez, esta red cuenta de tres partes. La primera, la tubería principal, está compuesta por una tubería de gran diámetro y que tiene como fin transportar el calor por largas distancias. Luego el fluido pasa a las tuberías de distribución, una serie de tuberías de menor diámetro que se ramifican a partir de este punto. Finalmente vendría el sistema de conexión que corresponde a la tubería particular de cada edificación.

Existen principalmente tres tipos de redes de distribución (Figura 3.4). La red radiada es la más barata pero a su vez la menos eficiente, mientras que la anular y la red en malla son más caras pero más eficientes. Estas últimas normalmente se emplean cuando existe más de una planta generadora.

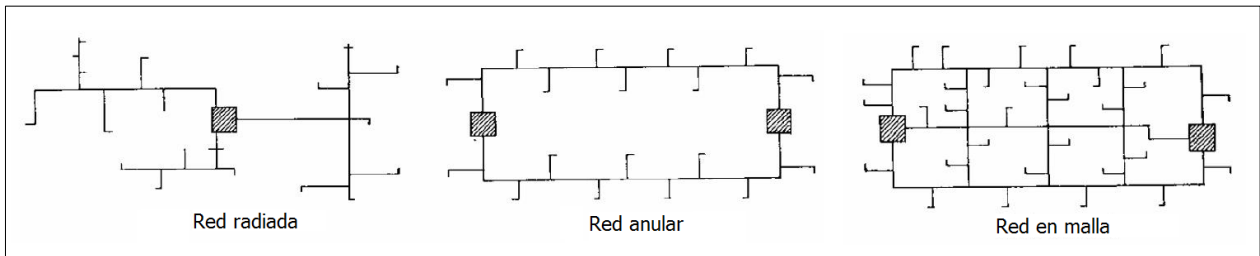


Figura 3.4: Posibles configuraciones de la red de distribución. Modificado de Valtinke (2016).

Deben existir tuberías que transporten el agua caliente al cliente así como tuberías que transporten el agua de vuelta hacia la central generadora. Estas tuberías pueden ser instaladas tanto sobre la superficie como bajo ella y se construyen a partir de diversos materiales aislantes.

Existen varias consideraciones que deben ser tomadas en cuenta. Entre ellas destacan la necesidad de un sistema de bombas que mantenga el fluido en circulación y además permita controlar la velocidad del flujo de manera que se pueda regular las distintas demandas en invierno y en verano. Debiera también instalarse válvulas en cada ramificación de la red para poder eventualmente cortar el abastecimiento en una zona en particular y no estar forzado a cortarlo en todo el sistema. El control de la presión es también sumamente importante para evitar que el fluido se gasifique y además asegurar que todas las partes de la red de distribución estén llenas de agua. Por otro lado, para evitar la corrosión, precipitación y gas en el sistema es necesaria una planta de tratamiento de aguas para controlar la química.

Subestaciones

Estas se componen de dos partes. La primera, la estación de transferencia, es la encargada de entregar el agua con las condiciones de caudal, presión y temperatura adecuadas y puede estar construida tanto para una casa como para un grupo de ellas. Luego, la instalación del cliente transfiere el agua, también con las condiciones adecuadas, al sistema doméstico.

Sistema doméstico

El agua que entra al sistema doméstico puede ser empleada tanto en calefacción como en consumo directo de agua. La temperatura varía fuertemente según la construcción del sistema de calefacción y si hay o no producción de agua caliente.

3.2.3 Temperaturas en red de distribución

Como se mencionó anteriormente, los sistemas de calefacción distrital se componen, en parte, de un sistema de distribución que es el encargado de transportar el fluido caliente hacia las edificaciones y luego de vuelta hacia la central generadora de calor. A pesar de que estas tuberías están revestidas con materiales aislantes y algunas veces enterradas bajo tierra, su eficacia al momento de mantener la temperatura del fluido que viaja en su interior depende considerablemente de la temperatura ambiente. Como podemos observar en el siguiente gráfico (Figura 3.5), temperaturas ambiente más bajas demandan mayores temperaturas en el sistema de distribución.

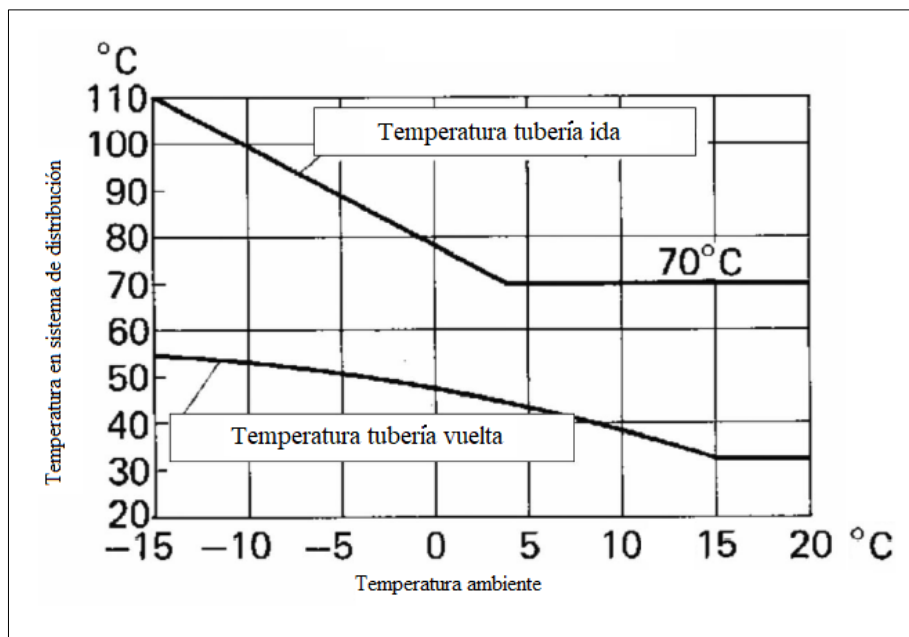


Figura 3.5: Temperatura en las tuberías de ida (hacia las edificaciones) y en las tuberías de vuelta (hacia la central generadora de calor) según la temperatura del ambiente. Modificado de Recknagel et al. (2009).

Para conocer la temperatura ambiente promedio en Punta Delgada se utilizó el explorador climático del Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR2)¹. Desafortunadamente los datos disponibles de la localidad más cercana a Punta Delgada, Monte Aymond, están incompletos por lo que se usaron los datos de la segunda localidad más cercana, correspondiente a Cerro Sombrero. Gracias a estos se obtuvo una temperatura promedio de 2,1 [°C]. En base a esta temperatura y en conjunto con la Figura 4.3, se obtiene una temperatura de ida de 74 [°C] y una temperatura de vuelta de 47 [°C] aproximadamente. Sin embargo, esto corresponde a un promedio anual y no de los meses más fríos. El mes que presenta las temperaturas más bajas corresponde a junio, para el cual se obtuvo una temperatura promedio de 0,5 [°C] entregando, por lo tanto, temperaturas de ida de 80 [°C] y de vuelta de 50 [°C] aproximadamente.

Relación de las temperaturas en la red de distribución con las temperaturas de entrada y salida de los pozos

El fluido que circula por el pozo no es el mismo que aquel que circula por la red de distribución. Por lo tanto, debe considerarse un intercambiador de calor entre estos dos circuitos de manera que sea posible transferir el calor (Figura 3.6). Debido a esto se consideraron dos supuestos: (1) es importante que la temperatura del fluido que sale del pozo sea mayor que la temperatura

¹ www.explorador.cr2.cl

indicada por la Figura 3.5. Para efectos de este trabajo se verán dos casos distintos: uno en el cual se considera que 5 [°C] adicionales son suficientes para que la transferencia de calor sea efectiva, lo que fija un límite inferior de 85 [°C] para la temperatura de salida del pozo, y el otro donde se consideran 10 [°C], fijando un límite de 90 [°C] para el mes de junio. Sin embargo, la cantidad de grados adicionales que se requieran dependerá en gran medida del intercambiador de calor que se utilice, por lo que estos 5 [°C] y 10 [°C] quedan sujetos a discusión; (2) por otro lado se considera que la temperatura en la tubería de vuelta es igual a la temperatura de entrada al pozo.

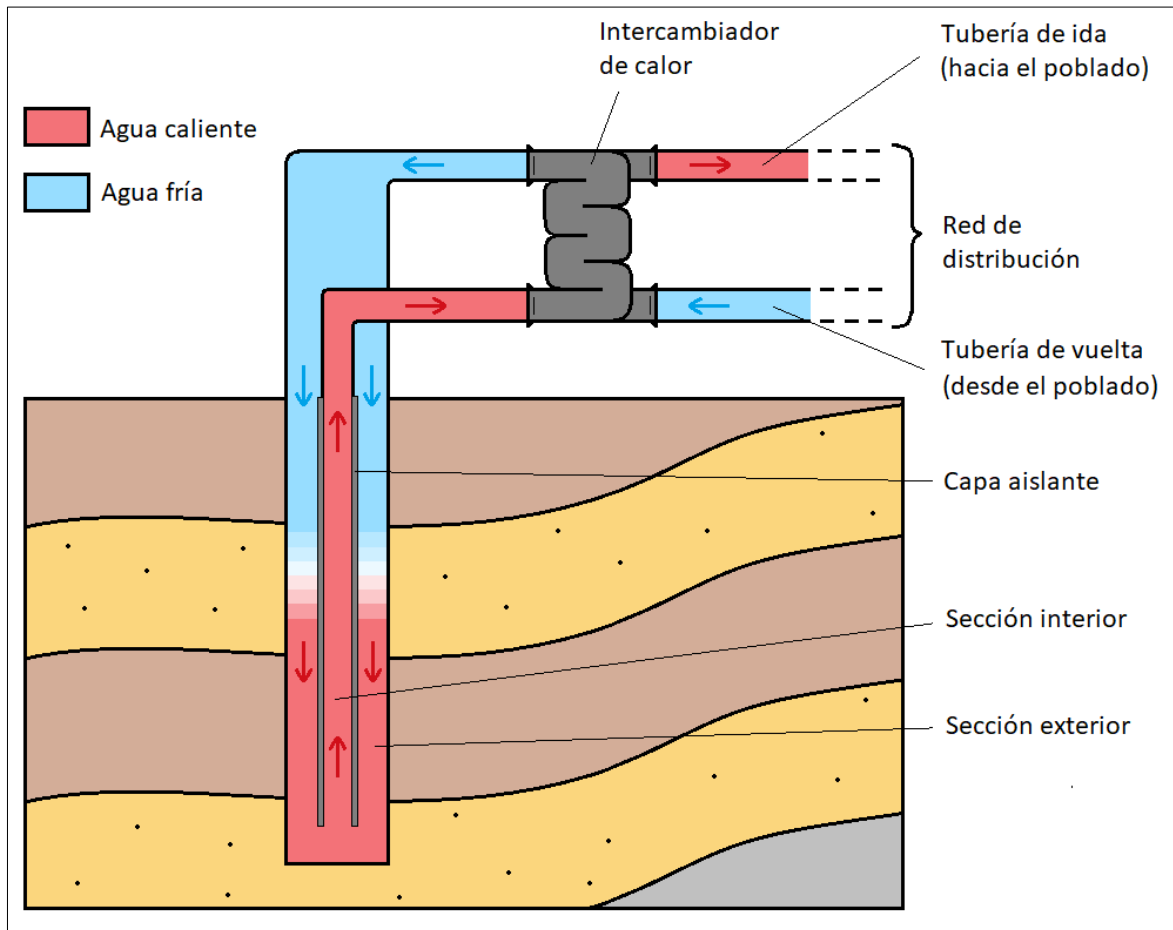


Figura 3.6: Esquema del pozo rehabilitado, parte de la red de distribución del sistema de calefacción distrital y el intercambiador de calor que los conecta.

CAPITULO 4. ANTECEDENTES PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO EXTRAÍBLE

4.1 Corrección de la temperatura

Generalmente la temperatura indicada en los perfiles entregados por la ENAP es la temperatura del lodo de perforación y no la temperatura real de la formación rocosa. El lodo de perforación es un fluido que se hace circular al perforar y es más frío que la roca circundante. Debido a esto la roca se enfría y el lodo se calienta, alcanzando luego de un cierto tiempo un equilibrio térmico. Cuando la circulación se detiene, el lodo gana temperatura de forma gradual, pero este proceso es lento y puede llegar a demorar meses. Así, las mediciones de temperatura subestiman la temperatura real de la roca y por lo tanto la temperatura indicada en los perfiles puede ser considerada como una temperatura mínima.

Para obtener la temperatura real de la roca se debe aplicar una corrección a la temperatura medida. El método recomendado para estos efectos es la corrección de Horner. Sin embargo, este método requiere de al menos tres mediciones de temperatura del lodo de perforación. Dado que pocas veces los pozos cuentan con esta cantidad de mediciones se deben realizar correcciones menos precisas. Una de ellas es la corrección simple para la cual es necesario contar solo con una medición de temperatura y el tiempo desde la circulación (*time since circulation*), el cual corresponde al tiempo que ha transcurrido desde que dejó de circular el lodo. Aun así la mayoría de los pozos no cuentan con este dato por lo que hay que realizar la corrección de último recurso (*last resort correction*), la cual consiste en simplemente añadir 18°C a la temperatura del lodo. Con este método se tienen errores en la temperatura real de la roca que oscilan entre los ± 9 [°C], sin embargo es también el método que generalmente entrega los valores más bajos, por lo que puede ser considerado como una temperatura mínima.

Las correcciones simples realizadas en este trabajo serán efectuadas a través del software de código abierto proporcionado por la compañía Zetaware el cual se encuentra disponible en el pie de página².

4.2 Funcionamiento de la herramienta analítica para el cálculo de temperaturas

Como se mencionó anteriormente, en el presente trabajo se creó una herramienta analítica que permite calcular la temperatura de salida del fluido inyectado. A continuación se explica en detalle su funcionamiento.

4.2.1 Aspectos técnicos

Los cálculos de transferencia de calor que ocurren en el pozo fueron modelados en una planilla de Excel la cual consta de dos páginas. En la hoja llamada “Datos” encontramos tres secciones que se diferencian por distintos colores: azul, naranja y verde (Figura 4.1). La primera sección corresponde a la entrada de datos y es aquí donde el usuario debe ingresar los parámetros requeridos. La segunda sección muestra datos generados, esto se refiere a datos que son

² <http://www.zetaware.com/utilities/bht/timesince.html>

calculados automáticamente por la hoja de cálculo y que son necesarios para la generación de los resultados. Finalmente, la tercera sección, representada en verde, corresponde a los resultados, marcando en rojo aquellos de mayor relevancia, i.e. el calor total y la temperatura en la salida. En esta hoja podemos encontrar también una imagen (Figura 3.2) que muestra a que corresponden los distintos parámetros utilizados en las ecuaciones de intercambio de calor, además de un gráfico mostrando como se calienta o enfría el fluido a medida que desciende. La segunda hoja no requiere de la atención del usuario y corresponde solo al lugar donde son llevados a cabo algunos de los cálculos.

ENTRADA DE DATOS		DATOS GENERADOS	
temperatura entrada, T1	40 °C	área exterior, Ae	0,0182 m ²
radio interior, r	0,07 m	área interior, Ai	0,0154 m ²
radio exterior, R	0,122 m	velocidad, v	0,1 m/s
espesor aislante, t	0,0254 m	diametro hidráulico exterior, DHe	0,0532 m
caudal, m	2,00 kg/s	diametro hidraulico interior, DHi	0,14 m
densidad fluido promedio, p	988,05 kg/m ³	gradiente geotermal, g	0,043 °C/m
conductividad roca promedio, kr	2,3 W/m*K	Reynolds fluido exterior, Ree	14845
conductividad fluido promedio, kf	0,6 W/m*K	Reynolds fluido interior, Rei	39066
conductividad aislante, ka	0,027 W/m*K	coeficiente de transferencia convectivo bajada exterior, he	875 W/m ² K
diametro roca constante, Dr	0,5 m	coeficiente de transferencia global roca-exterior, Ure	4,58 W/m ² K
viscosidad dinamica fluido promedio, μ	0,0004656 Pa*s	coeficiente de transferencia convectivo subida exterior, he'	244,01 W/m ² K
temperatura roca, Tr	122 °C	coeficiente de transferencia convectivo subida interior, hi	721,17 W/m ² K
profundidad medición de temperatura	2822 m	coeficiente de transferencia global exterior-interior, Uei	0,92 W/m ² K
profundidad pozo	2822 m	resolución vertical	14,11 m
Prandtl promedio, Pr	3		
calor específico fluido, Cp	4190 J/kg*K		

RESULTADOS	
calor bajando	192412,8 W
perdida calor subiendo	22625,1 W
calor total en fondo	215.037,9 W
dT bajada	25,7 °C
Temperatura fondo	65,7 °C
perdida temperatura subiendo	2,70 °C
Δcalor subiendo (Q4)	192.412,8 W
Calor total en salida	527612,8 W
Temperatura salida (T4)	63,0 °C

Figura 4.1: Distintas secciones de la hoja de cálculos. El usuario solo debe ingresar datos en la sección azul, las otras dos secciones son completadas automáticamente.

Muchos de los datos que son requeridos en la sección de entrada de datos no son inherentes al pozo y deberán ser aportados por el usuario. A continuación se dará una explicación detallada de cada uno de los parámetros que deben ser ingresados:

ENTRADA DE DATOS		
temperatura entrada, $T1$	50	°C
radio interior, r	0,07	m
radio exterior, R	0,173	m
espesor aislante, t	0,0254	m
caudal, \dot{m}	1,90	kg/s
densidad fluido promedio, ρ	980,53	kg/m ³
conductividad roca promedio, k_r	2,3	W/m*K
conductividad fluido promedio, k_f	0,6	W/m*K
conductividad aislante, k_a	0,027	W/m*K
diámetro roca constante, D_r	0,5	m
viscosidad dinamica fluido promedio, μ	0,000432	Pa*s
temperatura roca, T_r	138	°C
profundidad medición de temperatura	3155	m
profundidad pozo	3156	m
Prandtl promedio, Pr	2,6	
calor específico fluido, C_p	4190	J/kg*K

Figura 4.2: Sección de entrada de datos de la hoja de cálculo. Se pueden apreciar la totalidad de los parámetros que demanda la planilla al usuario para poder calcular la temperatura de salida del fluido.

- Temperatura de entrada, $T1$: corresponde a la temperatura a la que entra el fluido al pozo. Es a su vez la misma temperatura que viene en la tubería de vuelta del sistema de distribución (ver apartado 3.2.3) por lo que el usuario debe en primer lugar definir las temperaturas en la red de distribución, según la Figura 4.3, para poder ingresar este parámetro.
- Radio interior, r : es el radio de la tubería de menor diámetro encargada de transportar el fluido hacia arriba (Figura 3.2). Este parámetro debe ser definido por el usuario. Literatura pertinente: Davis & Michaelides (2009); Bu et al. (2012); Caulk & Tomac (2017).
- Radio exterior, R : es el radio de la tubería de revestimiento (Figura 3.2).
- Espesor aislante, t : corresponde al espesor de la capa aislante que separa la sección interior de la exterior. Literatura pertinente: Bu et al. (2012); Davis & Michaelides (2009).
- Caudal, \dot{m} : este depende en parte de la demanda térmica que se busca suplir y de la temperatura deseada en la red de distribución. Menores caudales entregaran mayores temperaturas de salida y mayores caudales entregaran una mayor potencia. Se debe por lo tanto buscar un caudal que sea capaz de entregar la temperatura requerida en la red de distribución y al mismo tiempo la potencia necesaria.

- Densidad fluido promedio, ρ : debido a que la densidad de los fluidos depende de la temperatura, a lo largo del pozo la densidad irá variando. Estos cambios son pequeños (no superan el 2% para las temperaturas esperadas) y por ende basta con tomar una densidad promedio estimada.
- Conductividad roca promedio, k_r : los pozos atraviesan varios tipos de litología a medida que descienden, es por esto que la conductividad de la roca varía. Se recomienda por lo tanto elegir una conductividad que sea lo más representativa de las litologías encontradas en la zona (ver apartado 4.4).
- Conductividad fluido promedio, k_f : al igual que la densidad, la conductividad del fluido varía con la temperatura, por lo que es necesario considerar un valor promedio.
- Conductividad aislante, k_a : este parámetro dependerá del aislante escogido. Literatura pertinente: Davis & Michaelides (2009); Bu et al. (2012); Caulk & Tomac (2017).
- Diámetro roca constante, D_r : este parámetro indica hasta que distancia se considerará que la roca ve su temperatura afectada, e.g. un diámetro de roca constante de 2 metros quiere decir que 1 metro más allá del centro del pozo la roca no pierde ni gana calor por efectos del fluido circulante. Literatura pertinente: Bu et al. (2012); Caulk & Tomac (2017);
- Viscosidad dinámica fluido promedio, μ : otro parámetro más que depende de la temperatura, por lo que se aconseja considerar un valor promedio según las temperaturas que se esperan encontrar.
- Temperatura roca, T_r : esta temperatura hace referencia a la temperatura real de la roca y no a la del lodo de perforación (ver apartado 4.1).
- Profundidad medición de temperatura: a qué profundidad fue medida la temperatura que se indicó en el parámetro anterior.
- Profundidad pozo: equivalente al largo total del pozo.
- Prandtl promedio: el número de Prandtl es un número adimensional proporcional al cociente entre la viscosidad cinemática y la difusividad térmica ($Pr = \text{viscosidad cinemática} / \text{velocidad de difusión de calor}$). Una vez más se recomienda considerar un valor promedio.
- Calor específico fluido, C_p : dependerá del fluido escogido.

4.2.2 Aspectos teóricos

La hoja de cálculo ocupa las ecuaciones descritas en la sección 3.1.2. Se procederá por lo tanto a dar una explicación con mayor detalle respecto a cómo se utilizaron aquellas ecuaciones.

En primer lugar, el programa calcula la temperatura alcanzada en el fondo producto del intercambio de calor que ocurre entre la roca y el fluido que viaja por el anillo externo del pozo. Para ello ocupa la ecuación (3.1) evaluándola por tramos. Se determinó que es suficiente considerar para ello 200 tramos ya que hacerlo en más no conlleva una variación importante en la precisión del resultado. Cada tramo tendrá por lo tanto un largo igual al largo total del pozo dividido en 200. El largo de estos tramos puede ser encontrado en la sección de datos generados como “resolución vertical”. Al evaluar el intercambio de calor que ocurre entre la roca y el fluido descendente se utiliza un coeficiente de transferencia de calor, U_{re} , que considera tanto la conductividad del fluido como la de la roca (ecuación (3.2)). Por un lado este coeficiente depende del diámetro de roca constante que es la distancia más allá de la cual se considera que la roca no pierde calor. Por otro lado depende del coeficiente de transferencia de calor convectivo el cual a su vez depende del régimen del fluido. Se debe siempre buscar que el fluido esté en régimen turbulento, i.e. $Re \geq 4500$, de lo contrario se tendrán flujos laminares o de transición los cuales son ineficientes al momento de transportar el calor hacia las secciones más internas del pozo. Es

por este motivo que, en caso de que se tengan $Re < 4500$, las casillas correspondientes estarán rellenas por color rojo, indicando que hay algún dato que debe ser revisado. Cabe mencionar que la transferencia de calor que ocurre en la pared del pozo correspondiente al revestimiento (*casing*) es omitida debido a la alta conductividad termal que presenta este metal y a su reducido espesor.

Una vez calculado el intercambio de calor que ocurre entre la roca y el fluido descendente, se procede a calcular el intercambio de calor que hay entre el fluido descendente y el ascendente. Para ello se emplea la ecuación (3.5). Esta es en realidad la misma ecuación empleada anteriormente, ahora evaluada entre la sección interior y exterior del pozo. El coeficiente de transferencia de calor a considerar en este caso, U_{ei} , debe considerar tanto la conductividad del fluido externo e interno como la de la capa aislante. En la literatura suelen escoger poliestireno como el material de la capa aislante, el cual tiene un coeficiente de conductividad termal de 0,027 [W/mK], sin embargo el usuario puede modificar este parámetro en la sección entrada de datos, “conductividad aislante” como también el espesor de este. De la misma manera que U_{re} depende del régimen del fluido, en U_{ei} también es importante tener un régimen turbulento tanto en la pared externa como en la interna del aislante.

Para el cálculo de intercambio de calor entre el fluido descendente y el ascendente también se consideraron 200 pasos. En el primer paso, la temperatura del fluido exterior, T_{fe} , es igual a la del interior, T_{fi} , por lo que no hay intercambio de calor. Este paso podría considerarse como el lugar del fondo del pozo donde el flujo revierte su sentido. Las diferencias comienzan a aparecer a partir del segundo paso, en el cual se considera que T_{fi} sigue siendo la misma pero T_{fe} corresponde a la temperatura del fluido externo un paso más arriba.

4.3 Cálculo de demandas térmicas

Para poder diseñar un sistema de calefacción distrital es necesario conocer la demanda térmica que se busca suplir, de otra manera puede que el sistema no sea capaz de dar abasto o estar sobredimensionado, lo cual se traduce en mayores e innecesarios costos. A continuación se resume un método para calcular la demanda térmica basado en la memoria titulada “Evaluación de un sistema de climatización con bomba de calor geotérmica para una casa representativa en diferentes climas de Chile” de Ortega (2017). Cabe mencionar que la totalidad del método está detallada en esta memoria por lo que aquí solo se presentan algunos conceptos generales.

4.3.1 Cargas térmicas y balance energético de la vivienda

La carga térmica de la vivienda equivale a la potencia máxima demandada por esta para poder llevar la temperatura del edificio a las condiciones de comodidad térmica. Existen diversos componentes que afectan el cálculo de las cargas térmicas (Figura 4.3):

- Carga por transmisión, Q_c
- Carga por ventilación e infiltraciones, Q_v
- Ganancias solares, Q_s
- Ganancias internas por equipos y personas, Q_i

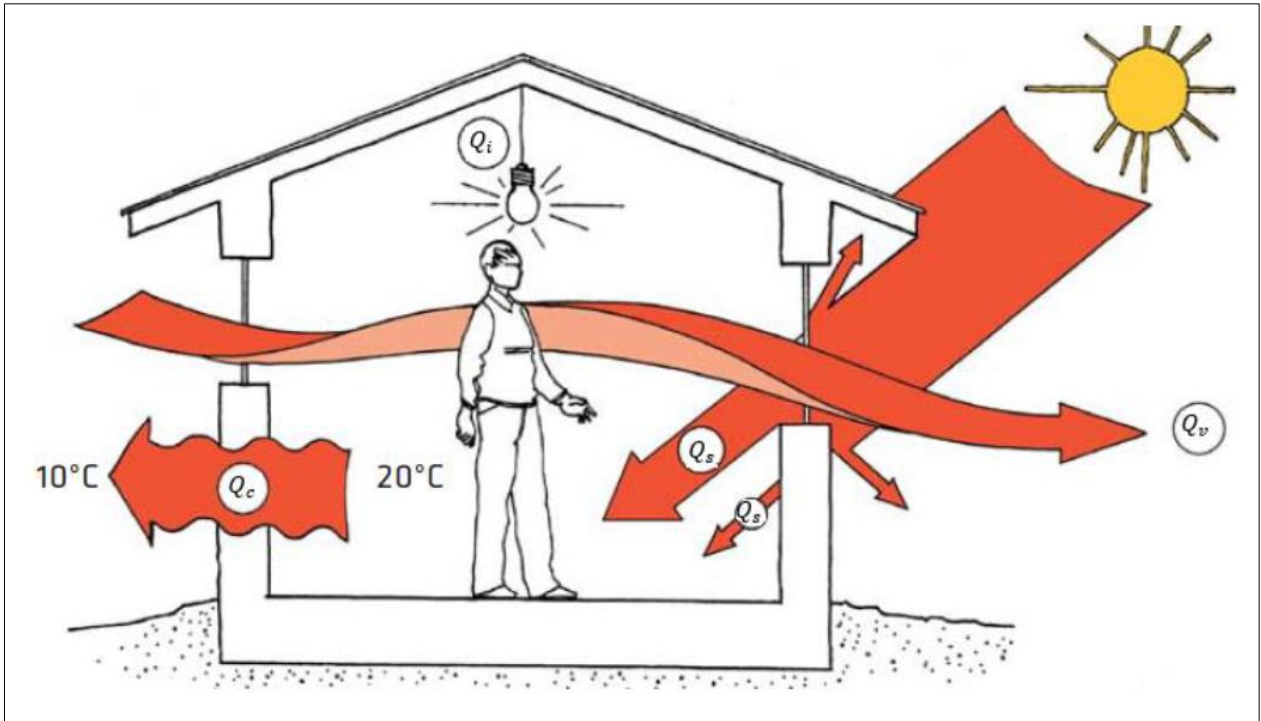


Figura 4.3: Distintos componentes que afectan el cálculo de las cargas y ganancias térmicas. Tomado de Bustamante (2009).

La suma de todas estas cargas y ganancias entregan la carga total según la siguiente ecuación:

$$Q_T = Q_c + Q_v + Q_s + Q_i \quad (4.1)$$

Si $Q_T < 0$ entonces la vivienda está perdiendo calor, y si $Q_T > 0$ la vivienda está ganando calor.

Antes de proceder a explicar cada uno de estos 4 componentes, es importante explicar el término de diferencia de temperatura (ΔT) el cual aparece reiteradamente y será de utilidad más adelante. Este término hace referencia a la diferencia de temperatura que hay entre la temperatura ambiente exterior (T_a) y la temperatura de comodidad de la vivienda (T_0). Esta última depende de si se busca calentar o enfriar el edificio, siendo igual a 20°C en el primer caso y 24°C en el segundo. De esta manera:

$$\Delta T = T_a - T_0, \text{ con } T_0 = \begin{cases} 20^\circ\text{C} & \text{si } T_a < 20[^\circ\text{C}] \\ 24^\circ\text{C} & \text{si } T_a > 24[^\circ\text{C}] \\ T_a & \text{si } 20^\circ\text{C} < T_a < 24[^\circ\text{C}] \end{cases} \quad (4.2)$$

La temperatura de confort térmico de la vivienda (T_0) corresponde a la temperatura a la que se debe llegar. En el caso de la calefacción corresponde a $20 [^\circ\text{C}]$ y en el caso de la refrigeración a 24°C . En el caso en que la temperatura exterior (T_a) corresponda a un valor entre $20 [^\circ\text{C}]$ y $24 [^\circ\text{C}]$, las cargas térmicas por transmisión, ventilación e infiltración serán nulas.

Cargas por transmisión

Las cargas por transmisión hacen referencias a todas aquellas pérdidas o ganancias de calor producidas por conducción y convección modeladas según la siguiente ecuación:

$$Q_c = \sum_j (U * A)_j * \Delta T [W] \quad (4.3)$$

Donde $(U*A)_j$ corresponde al producto entre la transmisividad del elemento j, que puede ser muros, ventanas, techos y cerramiento del piso, con su área respectiva:

$$Q_c = (U_m * A_m + U_v * A_v + U_t * A_t + k_p * P_p) * \Delta T [W] \quad (4.4)$$

Donde el primer término U_m corresponde a la transmisividad de las murallas, el segundo término U_v a la transmisividad de las ventanas, el tercer término U_t a la transmisividad de la techumbre y el cuarto término k_p a la conductividad del cerramiento perimetral del piso.

Cargas por ventilación e infiltración

Estas cargas aluden a aquellas pérdidas o ganancias térmicas producto de la renovación del aire interior por aire exterior. Esta carga queda descrita por la siguiente ecuación:

$$Q_v = \rho_a * C_p * \dot{V}_a * \Delta T [W] \quad (4.5)$$

Donde,

- $\rho_a = 1,2$ [kg/m³], equivalente a la densidad del aire media
- $C_{p,a} = 1005$ [J/kg°C], que es el calor específico del aire
- ΔT es la diferencia de temperatura detallada en la ecuación 4.2
- \dot{V}_a [m³/s] que corresponde al flujo volumétrico del aire

Ganancias internas

Estas ganancias se refieren a todas las que ocurran dentro del hogar producto de focos térmicos tales como personas, luces, electrodomésticos, entre otros. Se calcula mediante la siguiente ecuación propuesta por la American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE) (2009):

$$Q = \frac{136 + 2,2 * A_{vivienda} + 22 * N_p}{24} [W] \quad (4.6)$$

Donde $A_{vivienda}$ corresponde a la superficie del edificio y N_p al número de habitantes, el cual es considerado en promedio igual a 4.

Ganancias solares

Las ganancias solares se componen de dos partes; ganancias por elementos opacos (Q_{so}) y ganancias por elementos traslúcidos (Q_{sv}). La ganancia solar total será por lo tanto igual a la suma de ambos componentes:

$$Q_s = Q_{so} + Q_{sv} [W]$$

4.3.2 Demanda y consumo energético

A continuación se presentan las demandas térmicas calculadas en la memoria de título de Ortega (2017) (Tabla 4.1). Se puede apreciar tanto la carga máxima de calefacción como la demanda energética anual.

Tabla 4.1: Cargas máximas de calefacción y demanda energética de calefacción anual para distintas ciudades. Modificado de Ortega (2017).

Ciudad	Carga Máxima Calefacción [kW]	Demanda Energética Calefacción [kWh/año]
Arica	8,42	13.324
Calama	6,45	14.021
Vallenar	5,86	14.565
Coquimbo	4,71	13.426
Santiago	8,05	17.954
Temuco	7,98	22.837
Valdivia	6,27	17.503
Coyhaique	6,09	18.704
Punta Arenas	6,00	23.573

Existen varios meses en el año en donde, dependiendo de la ciudad, no es necesario calefaccionar o refrigerar una vivienda. Esto se puede apreciar en la tabla 4.2, en donde la letra *C* hace referencia a aquellos meses donde se requiere calefacción y la letra *R* a aquellos meses donde es necesario refrigerar.

Tabla 4.2: Meses en que es necesario calefaccionar (indicados por la letra C) y en que es necesario refrigerar (indicados por la letra R), según la ciudad. Tomado de Ortega (2017).

Ciudad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Arica	R	R	R				C	C				R
Calama	R	R			C	C	C	C	C			R
Vallenar	R				C	C	C	C	C			
Coquimbo					C	C	C	C	C			
Santiago	R	R	R		C	C	C	C				R
Temuco				C	C	C	C	C	C	C	C	
Valdivia				C	C	C	C	C	C	C		
Coyhaique			C	C	C	C	C	C	C	C	C	
Punta Arenas			C	C	C	C	C	C	C	C	C	

En base a esto se definieron las demandas energéticas por temporadas:

Tabla 4.3: Demanda energética por temporada y ciudad. Tomado de Ortega (2017).

Ciudad	Demanda Energética Calefacción [kWh/Temporada]	Demanda Energética Refrigeración [kWh/Temporada]
Arica	4.176	4.840
Calama	7.589	1.777
Vallenar	8.140	379
Coquimbo	7.644	0
Santiago	9.443	4.256
Temuco	17.975	0
Valdivia	13.294	0
Coyhaique	16.206	0
Punta Arenas	19.844	0

Para efectos de este trabajo, Punta Arenas es la ciudad más representativa de las ahí expuestas. De hecho, Punta Delgada y Punta Arenas se encuentran a tan solo 120 kilómetros de distancia en línea recta y a 100 kilómetros de distancia en la dirección Norte-Sur. Debido a su cercanía y a sus similares condiciones geográficas (ambas ciudades vecinas al mar) se consideraran los valores de Punta Arenas como representativos de la situación en Punta Delgada.

Según el censo del año 2002, Punta Delgada cuenta con 82 viviendas, por lo que se obtiene un consumo energético anual total de 1.932.986 [kWh/año]. Cabe mencionar que se utilizó el valor de demanda energética de la Tabla 4.1, y no de la Tabla 4.3, esto con el fin de buscar resultados más conservadores.

Para poder realizar un diseño óptimo del sistema es necesario acotar las demandas a periodos de tiempo más cortos y predecibles. Una buena estimación para esto es dividir los periodos en meses ya que presentan temperaturas similares cada año. Para poder calcular la demanda energética mensual a partir de la demanda energética anual se calculó la diferencia entre la temperatura media de cada mes con la temperatura de confort (20 [°C]). Los datos de temperatura ambiente fueron obtenidos una vez más del explorador climático del CR2. En base a esto se definió un porcentaje con respecto a la diferencia total y se consideró que ese porcentaje corresponde al porcentaje de la demanda energética anual, para cada mes (Tabla 4.4).

Tabla 4.4: Demanda energética según el mes para el poblado de Punta Delgada. Se puede apreciar también la temperatura media mes a mes.

	Temperatura media	ΔT	%	Demanda energética [kWh/mes]
enero	10,4	9,6	5,8	112.919
febrero	11,2	8,8	5,4	103.991
marzo	9,1	10,9	6,6	128.517
abril	6,1	13,9	8,5	164.602
mayo	4,0	16,0	9,8	189.610
junio	0,5	19,5	11,9	230.450
julio	2,7	17,3	10,6	204.521
agosto	3,4	16,6	10,1	196.055
septiembre	4,8	15,2	9,3	179.773
octubre	6,1	13,9	8,5	163.906
noviembre	8,7	11,3	6,9	133.825
diciembre	9,4	10,6	6,5	124.817
TOTAL		163,5	100	1.932.986

4.4 Conductividad termal según litología

Como se mencionó en el apartado 4.2.1, la conductividad termal de las rocas es un parámetro que debe ser ingresado en la planilla por el usuario. Sin embargo este parámetro es sumamente difícil de determinar ya que depende de numerosos factores tales como el grado de saturación de los poros, la temperatura ambiente, el grado de compactación, la granulometría, entre otros (Clauser & Huenges, 1995). Sumado a esto, es común que un pozo atraviese numerosos tipos de litologías dificultando aún más la estimación de esta medida.

Para simplificar el análisis se sugiere determinar el tipo de litología predominante y en base a ésta determinar la conductividad. En caso de que no exista una litología predominante se puede considerar el largo total de cada litología para hacer un promedio ponderado de estas. La Figura 4.4 muestra rangos de conductividad para los distintos tipos de litologías y puede ser utilizada para estos efectos. Cabe mencionar que la conductividad elegida para los pozos aledaños a Punta Delgada es de 2,3 [W/mK]. Una explicación más detallada respecto a la elección de este valor puede ser encontrada en el apartado 6.3.1.

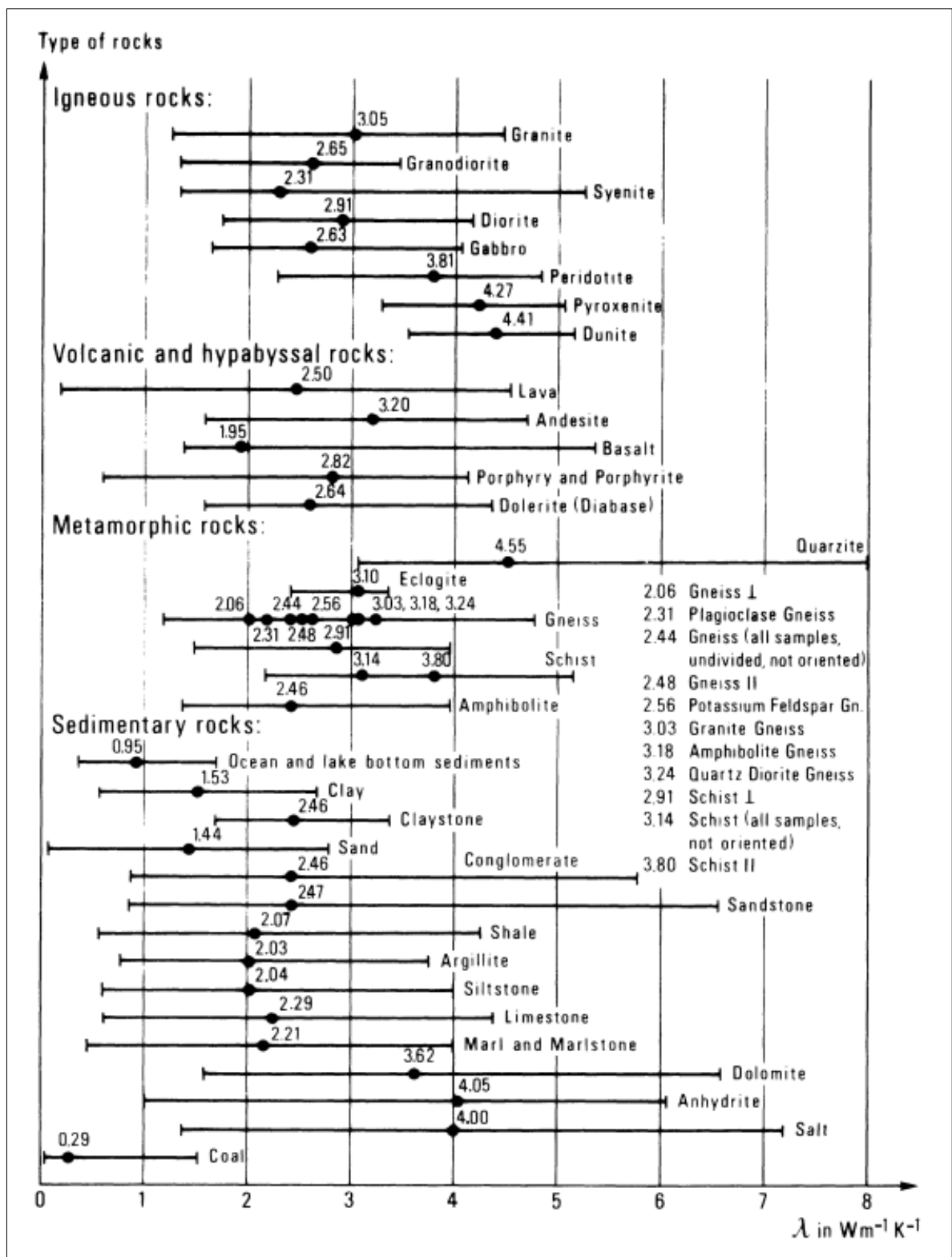


Figura 4.4: Conductividad termal según los distintos tipos de litologías. Tomado de Zoth & Haenel (1988).

CAPITULO 5. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO EXTRAÍBLE

A continuación se presenta una metodología para evaluar el potencial geotérmico extraíble de la rehabilitación de pozos petroleros abandonados como intercambiadores de calor verticales cerrados. Esta se divide en cuatro etapas principales; selección preliminar de posibles pozos a rehabilitar, recopilación de datos de estos pozos, evaluación del potencial geotérmico de estos y selección del (los) mejor(es) pozo(s). Adicionalmente, en caso de contar con la demanda térmica que se desea abastecer, se puede hacer la elección del pozo teniéndola en cuenta.

5.1 Selección preliminar de pozos

Como se mencionó en el apartado 3.2.3, el calor extraído del pozo viaja, en forma de agua, a través de una tubería hasta llegar a la zona que se desea abastecer. Estas tuberías cuentan con una serie de materiales aislantes y muchas veces van instaladas bajo tierra, todo esto con el fin de mantener la temperatura del agua que viaja en su interior lo más cercana posible a la temperatura que se obtuvo en el pozo. Sin embargo, estas medidas se traducen en costos elevados y dificultades técnicas y aun así ocurre pérdida de calor, motivo por el cual se deben seleccionar pozos que se encuentren lo más cerca posible al poblado.

En base a esto, como primera aproximación se propone seleccionar pozos que se encuentran a una distancia no mayor de 7 kilómetros del centro del poblado. Una forma de realizar esta selección preliminar de manera eficiente es mediante algún software de procesamiento geográfico. Se debe por lo tanto graficar en un mapa todos los pozos disponibles en la zona y determinar aquellos que se encuentren a máximo 7 kilómetros a la redonda. Cabe destacar que esta distancia fue elegida de manera arbitraria, para comprender mejor esto se puede acudir al apartado 7.1.1.

Una vez realizado esto, se debe verificar el estado de los pozos seleccionados. Aquellos que sigan en operación o que se encuentren definitivamente abandonados (no pueden ser rehabilitados) deben ser descartados. El resto de los pozos son los posibles candidatos para ser rehabilitados como pozos geotérmicos.

5.2 Base de datos

La hoja de cálculo demanda ciertos datos que son inherentes a los pozos. Es por lo tanto importante generar previamente una base de datos que cuente con ciertos parámetros, los cuales serán requeridos para conocer la temperatura a la que saldrá el fluido (Tabla 5.1).

Se puede apreciar que los principales datos de los pozos que deben ser rescatados son:

- La temperatura registrada
- La profundidad a la que fue registrada esta temperatura
- El tiempo desde la circulación (ver apartado 4.1)
- El largo total del pozo
- El radio exterior, el estado del pozo
- Sus coordenadas

Tabla 5.1: Ejemplo de relleno de la base de datos. En ella se puede observar los distintos parámetros necesarios para el cálculo de temperaturas.

	EJEMPLO 1	EJEMPLO 2	EJEMPLO 3	
TEMPERATURA REGISTRADA [°C]	88	97	90	95
TIEMPO DESDE CIRCULACIÓN [HRS]	3	DESC	3	2
TEMPERATURA CORRECCION SIMPLE [°C]	110	DESC	114	119
TEMPERATURA CORRECCION +18	106	115	108	113
PROFUNDIDAD MEDICION [m]	2865	2748	2789	2789
GRADIENTE [°C/m]	0,0370	0,0418	0,0481	0,0427
GRADIENTE PROMEDIO [°C/m]	0,0370	0,0418	0,0454	
LARGO POZO [m]	2866	2749	2789	
RADIO EXTERIOR [m]	0,122	0,122	0,137	
ESTADO	cerrado descartado	cerrado ind. hidroc.	cerrado ind. hidroc.	
COORDENADA E	453322	457163	458113	
COORDENADA S	4204125	4208318	4207182	

Como se puede observar en el ejemplo, algunos pozos tienen más de una medición de temperatura. En aquellos casos se recomienda trabajar con el gradiente promedio. Por otro lado, algunas veces la información respecto a los tiempos desde la circulación no está indicada de manera clara en los perfiles. Si ese es el caso, entonces se anotó el dato en color naranja, indicando que es mejor trabajar con la temperatura provista por la corrección de último recurso (ver apartado 4.1). De otra forma el dato se anota en verde y conviene por lo tanto trabajar con la corrección simple.

5.3 Cálculo de temperaturas

Luego de seleccionar los pozos y reunidos sus respectivos datos se procede a ingresar estos en la planilla de Excel diseñada para calcular las temperaturas a la que saldrá el fluido y la potencia (ver apartado 4.2). Para ello se puede hacer variar los resultados según el caudal. Caudales más altos entregarán una menor temperatura pero mayor potencia, y viceversa. Por este motivo se puede determinar el caudal necesario para alcanzar la demanda energética mínima y el caudal para alcanzar la temperatura deseada en la red de distribución. Muchas veces los pozos no son capaces de satisfacer ambas demandas simultáneamente, en cuyo caso se puede considerar suplir el déficit con otra fuente de energía.

5.4 Selección de pozos definitivos

Una vez ingresados los datos de todos los pozos candidatos a la herramienta analítica, se procede a escoger aquellos pozos que posean el mejor rendimiento. Para ello se deben tener en cuenta dos factores: el rendimiento del pozo y la distancia de este a la localidad que se desea climatizar. Por supuesto se buscan rendimientos lo más altos posibles y distancias lo más reducidas posibles, sin embargo, si en más de un pozo se cumple tanto con la temperatura como con la demanda energética requerida, entonces se le debe dar prioridad a la distancia. Lo ideal es que el pozo se ubique dentro o inmediatamente aledaño al poblado. Esto debido a las pérdidas de calor que puede sufrir el fluido calo-portador durante el viaje, el elevado costo de las tuberías que lo transportan y la dificultad técnica que supone instalarlas.

CAPITULO 6. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO EXTRAIBLE EN PUNTA DELGADA, MAGALLANES

6.1 Selección preliminar de pozos

Como se mencionó en la sección 5.1, se realizó una selección preliminar de los pozos utilizando para ello el software Arcgis 10.4. En él se dibujó un círculo de 7 kilómetros de diámetro con su centro localizado en el centro del poblado de Punta Delgada (Figura 6.1).

Según esto, los pozos seleccionados son:

- CHULENGO 1
- GUANACO 1 & 2
- MERIC 1 & 2
- NIKA 1, 2, 3 & 4
- PAMPA LARGA 3, 6, 7 & 9

Sin embargo los pozos NIKA 1 y PAMPA LARGA 3 son productores de gas mientras que los pozos PAMPA LARGA 6, PAMPA LARGA 7 y PAMPA LARGA 9 son productores de petróleo. Por este motivo estos pozos serán descartados del análisis, dejando solamente los siguientes pozos:

- CHULENGO 1
- GUANACO 1 & 2
- MERIC 1 & 2
- NIKA 2, 3 & 4

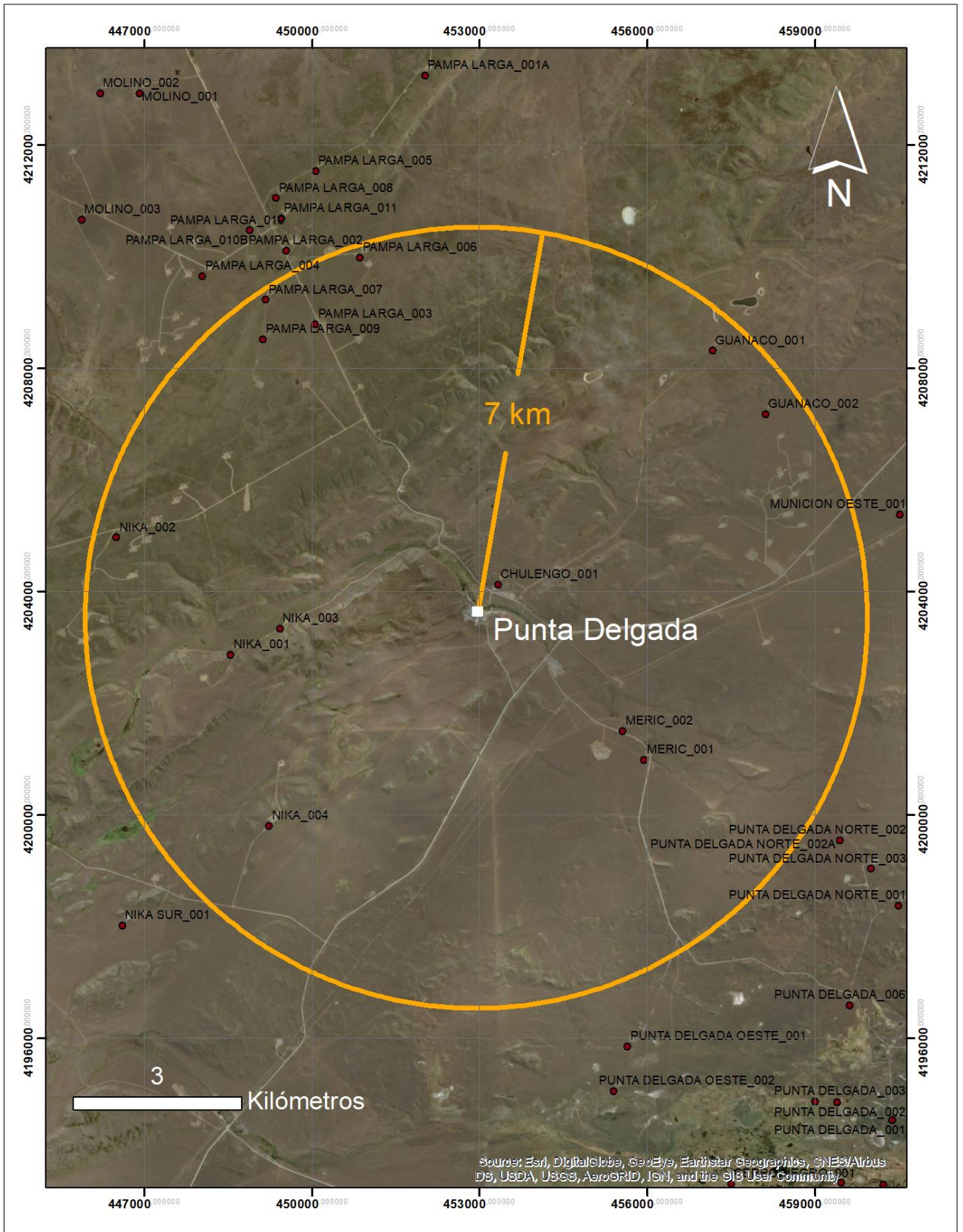


Figura 6.1: Mapa de la zona de estudio mostrando en naranja un círculo de 7 kilómetros de diámetro con su centro ubicado en el poblado de Punta Delgada. Los puntos rojos corresponden a pozos con sus respectivos nombres (WGS84, 19S).

6.2 Base de datos

Considerando los pozos seleccionados, mencionados previamente, se realizó una base de datos que contiene los parámetros expuestos en el apartado 5.2. Como se puede apreciar en la Tabla 6.1, ciertos valores están en color naranja, indicando que el dato no es certero. En estos casos es preferible utilizar la temperatura de corrección simple, indicada como “TEMPERATURA CORRECCIÓN +18”. En caso de que el dato esté en color verde es mejor entonces utilizar el valor de “TEMPERATURA CORRECCIÓN SIMPLE”. Para comprender a qué hacen referencia estas correcciones se puede acudir a la sección 4.1. Por otro lado, se puede observar que en la fila “GRADIENTE” los valores son los mismos que los presentes en “GRADIENTE PROMEDIO”. Esto se debe a que para los pozos seleccionados solo se cuenta con un dato de temperatura. Se dejó de todas formas ambas casillas para indicar que esto no siempre es así y que en caso de tener más de una medición se recomienda trabajar con el promedio.

Tabla 6.1: Base datos de los pozos preseleccionados. En la categoría “TIEMPO DESDE CIRCULACIÓN” y “TEMPERATURA CORRECCIÓN SIMPLE” algunos de los valores están en color naranja y otros en verde. Aquellos en naranja indican que no se tiene certeza de esta medición mientras que para los verdes el dato es certero.

	CHULENGO 1	GUANACO 1	GUANACO 2	MERIC 1
TEMPERATURA REGISTRADA [°C]	99	88	90	94
TIEMPO DESDE CIRCULACIÓN [HRS]	4	DESC	3,5	DESC
TEMPERATURA CORRECCION SIMPLE [°C]	122	DESC	114	DESC
TEMPERATURA CORRECCION +18	117	106	108	112
PROFUNDIDAD MEDICION [m]	2819	2752	2695	2537
GRADIENTE [°C/m]	0,0415	0,0385	0,0401	0,0441
GRADIENTE PROMEDIO [°C/m]	0,0415	0,0385	0,0401	0,0441
LARGO POZO [m]	2821	2752	2697	2538
RADIO EXTERIOR [m]	0,122	0,122	0,122	0,169
ESTADO	cerrado descartado	cerrado ind. hidroc.	cerrado ind. hidroc.	cerrado descartado
COORDENADA E	453322	457163	458113	455939
COORDENADA S	4204125	4208318	4207182	4200983

	MERIC 2	NIKA 2	NIKA 3	NIKA 4
TEMPERATURA REGISTRADA [°C]	89	112	110	DESC
TIEMPO DESDE CIRCULACIÓN [HRS]	DESC	1	2	3
TEMPERATURA CORRECCION SIMPLE [°C]	DESC	138	135	DESC
TEMPERATURA CORRECCION +18	107	130	128	DESC
PROFUNDIDAD MEDICION [m]	2550	3155	2920	2792
GRADIENTE [°C/m]	0,0420	0,0437	0,0438	DESC
GRADIENTE PROMEDIO [°C/m]	0,042	0,0437	0,0438	DESC
LARGO POZO [m]	2550	3156	2923	2793
RADIO EXTERIOR [m]	0,169	0,173	0,137	0,122
ESTADO	cerrado descartado	cerrado descartado	cerrado ind. hidroc.	cerrado descartado
COORDENADA E	455555	446491	449418	449226
COORDENADA S	4201504	4204970	4203337	4199804

6.3 Cálculo de temperaturas

6.3.1 Determinación de valores de los parámetros

Para poder calcular las temperaturas de salida de cada pozo hubo que definir previamente los parámetros requeridos por el programa, detallados en el apartado 4.2.1. A continuación se exponen los distintos valores elegidos.

- Temperatura entrada, T_I : como se mencionó en el apartado 3.2.3 la temperatura en la tubería de vuelta de la red de distribución debiese ser aproximadamente 50 [°C] para el mes que registró las temperaturas más bajas, junio. Para efectos de este trabajo, esta temperatura se considera equivalente a la temperatura de entrada al pozo.
- Radio interior, r : Davis & Michaelides (2009) hacen correr los modelos con 3 valores distintos; 8,9, 10,2 y 11,4 centímetros mientras que Bu et al. (2012) y Caulk & Tomac (2017) toman un valor, 5 y 6 centímetros respectivamente. Considerando estos valores, para efecto de este trabajo se escogió trabajar con un radio de 7 centímetros.
- Espesor aislante, t : Davis & Michaelides (2009) escogieron un espesor de 1 pulgada, o 2,54 centímetros y Bu et al. (2012) tomaron un espesor de 1 centímetro (Caulk & Tomac (2017) no especificaron). Para evitar grandes pérdidas de calor se prefirió trabajar con un valor más conservador de 2,54 centímetros.
- Caudal, m : este varía para cada pozo según se explicó en el apartado 4.2.1. Se dan a conocer más detalles de este parámetro en el apartado 6.3.2.
- Densidad fluido promedio, ρ : considerando que el fluido oscilará entre los 50 [°C] y los 80 [°C] aproximadamente, se escogió una densidad de 980,53 [kg/m³] que corresponde a la densidad del agua a 65 [°C].
- Conductividad roca promedio, k_r : debido a las distintas litologías presentes y a que la conductividad varía con la temperatura se hace muy complejo determinar una conductividad exacta. Sin embargo existe una marcada predominancia de litologías sedimentarias tales como lutitas, arcillolitas y areniscas por lo que se eligió un valor representativo de 2,3 [W/m·K] según la Figura 4.4.
- Conductividad fluido promedio, k_f : Al igual que para la densidad, se escogió una conductividad correspondiente a un promedio según las temperaturas que se esperan encontrar, arrojando en este caso un valor de 0,6 [W/m·K].
- Conductividad aislante, k_a : Se escogió poliestireno como aislante, el cual cuenta con una conductividad de 0,027 [W/m·K].
- Diámetro roca constante, D_r : Tanto Bu et al. (2012) como Caulk & Tomac (2017) escogieron radios de 200 metros. Por otro lado Davis & Michaelides (2009) omiten la pérdida de calor que pueda sufrir la roca circundante. En el caso de este informe, el modelo no considera la variable del tiempo y no trabaja con volúmenes finitos. Por este motivo al ingresar diámetros muy elevados la temperatura cae bruscamente. Es por este motivo que en este caso se decidió ocupar un diámetro roca constante de 0,5 [m] (ver apartado 7.3.1).
- Viscosidad dinámica fluido promedio, μ : Se escogió una viscosidad dinámica para agua a 65 [°C], equivalente a 0,000432 [Pa·s].
- Prandtl promedio, Pr : Este parámetro también varía con la temperatura, por lo que se escogió una vez más un valor representativo para 65 [°C] que equivale a 2,6.
- Calor específico, C_p : El valor elegido para este parámetro es 4190 [J/kg·K] que corresponde al calor específico del agua a 65 [°C].

El radio exterior, la temperatura de la roca, la profundidad de la medición y el largo del pozo son parámetros inherentes al pozo por lo que variarían según el pozo que se esté evaluando.

6.3.2 Temperaturas y energía extraíbles de los pozos aledaños a Punta Delgada

A continuación se entregan los resultados tanto de la temperatura como de la energía que puede ser extraída de cada pozo. Debido a que los resultados varían según el caudal que se haga circular por los pozos, se generaron varios escenarios.

En la Tabla 6.2 podemos encontrar dos casos distintos, el primero indica el caudal necesario para entregar 230.450 [kWh/mes], que corresponde a la demanda energética de Punta Delgada para el mes de junio. El segundo caso entrega el caudal requerido para poder alcanzar la temperatura necesaria en la red de distribución durante el mismo periodo, según la Figura 3.5. Se escogió el mes de junio ya que es aquel que registra las temperaturas más bajas y por ende las demandas más altas.

Ninguno de los pozos, salvo NIKA 2 y 3, son capaces de satisfacer ambos requisitos simultáneamente. Es decir, si se reduce el caudal lo suficiente como para que la temperatura de salida sea 85 [°C] entonces la energía entregada no es suficiente para cubrir la demanda mensual (y viceversa). Por otro lado, los pozos GUANACO 1 y 2 simplemente no son capaces de entregar 85 [°C] en la salida debido a que habría que reducir demasiado el caudal provocando así que el fluido deje de estar en régimen turbulento y por lo tanto ya no sería capaz de transportar eficientemente el calor hacia las secciones internas del pozo. Cabe mencionar que los 85 [°C] son considerando un intercambiador de calor tal que son necesarios 5 [°C] adicionales para que la transferencia de calor del pozo a la red de distribución sea efectiva. Más adelante se verá otro caso en donde se consideraran 10 [°C] adicionales.

Tabla 6.2: Caudales para cada pozo. En la columna de la izquierda se tiene el caudal necesario para alcanzar la demanda energética de Punta Delgada durante el mes de junio (230.450 [kWh/mes]) mientras que en la columna derecha se muestra el caudal para alcanzar la temperatura requerida en la red de distribución (85[°C]).

Pozo	Caudal suficiencia energética [kg/s]	Caudal suficiencia temperatura [kg/s]
CHULENGO 1	≥ 0,99	≤ 0,71
GUANACO 1	≥ 1,14	X
GUANACO 2	≥ 1,12	X
MERIC 1	≥ 0,96	≤ 0,76
MERIC 2	≥ 1,02	≤ 0,63
NIKA 2	≥ 0,67	≤ 1,90
NIKA 3	≥ 0,82	≤ 1,12

6.4 Selección pozos definitivos

La Figura 6.2 nos permite entender de mejor manera el rendimiento de los pozos, mostrando en rojo los caudales para los cuales se cumple la demanda energética, en amarillo aquellos donde se cumple la temperatura deseada en la red de distribución y en naranja ambos. Además los pozos están en orden de distancias crecientes hacia abajo, indicándose a la derecha su distancia al poblado de Punta Delgada. Podemos observar que para caudales muy bajos ya no se alcanza la temperatura deseada. Esto se debe a que para aquellos caudales el fluido deja de estar en estado turbulento (ver apartado 4.2.2).

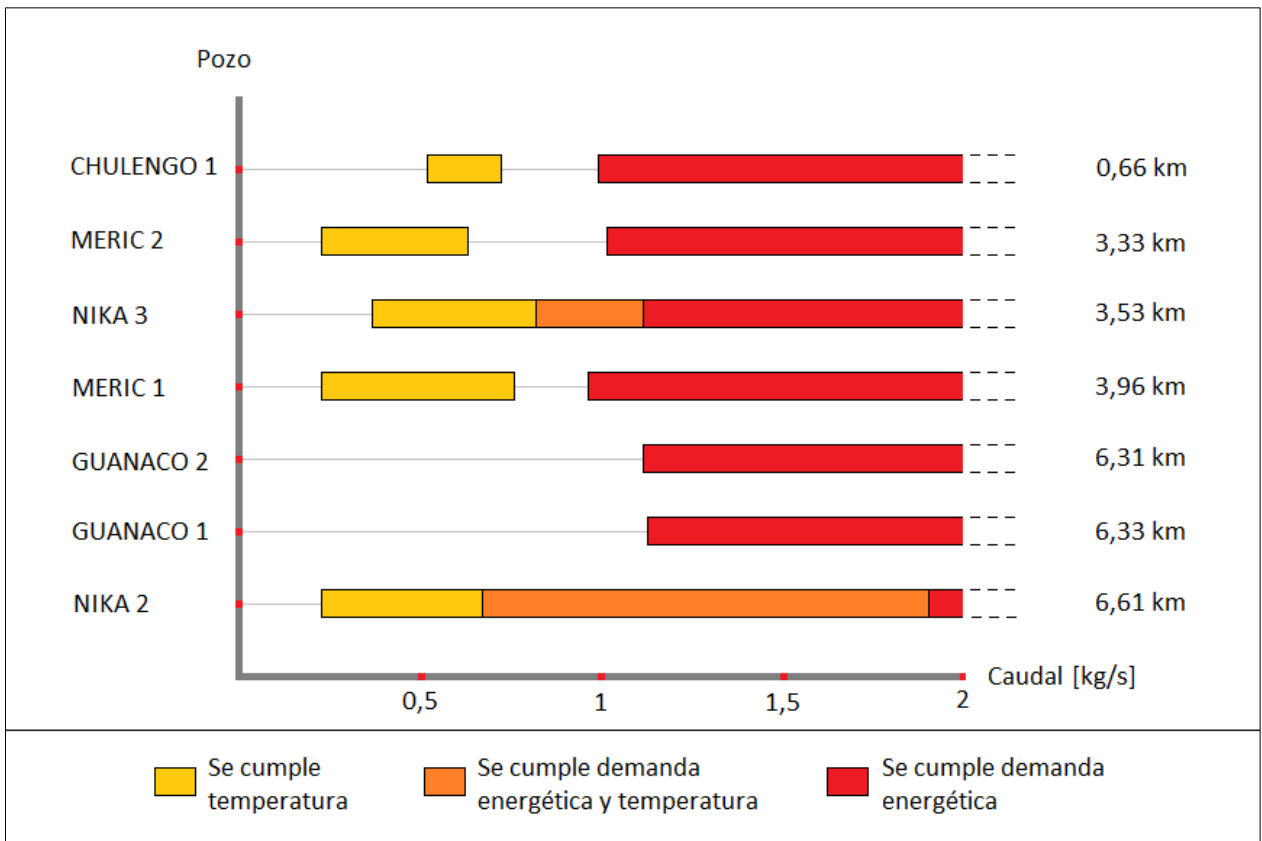


Figura 6.2: Rendimientos de los pozos seleccionados para el mes con las temperaturas más bajas, junio, según el caudal. La barra en color amarillo indica todos aquellos caudales para los cuales el fluido sale al menos a 85 [°C], la barra en color rojo los caudales para los cuales se generan al menos 230.450 [kWh/mes] y la barra en naranja aquellos caudales para los cuales se cumplen ambos requisitos de manera simultánea.

Si se considera solamente el rendimiento del pozo, entonces aquellos que mostraron ser los más eficientes son NIKA 2 y NIKA 3. Estos pozos son los únicos capaces de cumplir con la demanda tanto térmica como energética de manera simultánea. Esto implica que no es necesario recurrir a otra fuente de energía para suplir el déficit, reduciendo por lo tanto los costos operativos y simplificando el proyecto.

Sin embargo, como se mencionó previamente, es importante que la distancia entre el poblado y el pozo sea la menor posible para evitar pérdidas de calor y costos adicionales. Considerando las distancias de cada pozo podemos descartar el pozo NIKA 2, ya que si bien posee un mejor rendimiento que NIKA 3, ambos cumplen con las demandas de manera holgada, por lo que conviene seleccionar aquel que posee la menor distancia, por lo tanto, se pueden descartar todos aquellos pozos que se encuentran a mayor distancia que NIKA 3, ya que además de estar más lejos, también rinden menos. Esto deja como opción solamente a los pozos NIKA 3, CHULENGO 1 y MERIC 2. El pozo CHULENGO 1 presenta un mejor rendimiento y además esta considerablemente más cerca que MERIC 2 por lo que es entonces posible descartar este último.

Quedan solamente los pozos CHULENGO 1 y NIKA 3 y por ende la decisión se reduce a si es preferible priorizar el rendimiento por sobre la distancia o viceversa. Cabe destacar que las pérdidas de calor que pueda sufrir el fluido en los 3,53 [km] de viaje para el caso de NIKA 3 pueden ser parcialmente obviadas. Esto ya que al modificar el caudal que circula por el pozo se

puede hacer variar la temperatura de salida y la energía extraíble de tal manera que sea posible paliar las pérdidas que puedan ocurrir. Aun así, para efectos de este trabajo, se decidió seleccionar el pozo CHULENGO 1 debido a la reducida distancia y a los problemas técnicos que conllevaría instalar más de tres kilómetros de tuberías en una zona remota como lo es Punta Delgada.

6.5 Análisis en detalle del pozo seleccionado

Primero se verá el caso en el cual el intercambiador de calor demanda 5 [°C] adicionales para poder transmitir efectivamente el calor desde el pozo hacia la red de distribución, más adelante se realizará el mismo ejercicio con 10 [°C] adicionales.

6.5.1 Rendimiento mensual con 5 [°C] adicionales

Habiendo seleccionado el pozo CHULENGO 1, se analizó el rendimiento de este para todos los meses del año. Para ello se determinó la temperatura de entrada y la temperatura requerida para cada mes según el procedimiento explicado en el apartado 3.2.3. Por otro lado, las demandas energéticas mensuales fueron extraídas de la Tabla 4.4. Todo ello se encuentra resumido en la siguiente tabla:

Tabla 6.3: Temperatura necesaria en la salida del pozo considerando 5 [°C] adicionales, temperatura de entrada al pozo y demanda energética para cada mes del año.

Mes	Temperatura requerida [°C]	Temperatura entrada [°C]	Demanda energética [kWh/mes]
enero	75	40	112.919
febrero	75	40	103.991
marzo	75	40	128.517
abril	75	45	164.602
mayo	75	45	189.610
junio	85	50	230.450
julio	80	45	204.521
agosto	75	45	196.055
septiembre	75	40	179.773
octubre	75	40	163.906
noviembre	75	40	133.825
diciembre	75	40	124.817

En base a estos parámetros se obtuvieron los siguientes caudales:

Tabla 6.4: Caudales necesarios según el mes para el pozo CHULENGO 1 considerando 5 [°C] adicionales. En la columna izquierda se tiene el caudal necesario para alcanzar la demanda energética mientras que en la columna derecha los caudales necesarios para alcanzar la temperatura requerida.

Mes	Caudal suficiencia energética [kg/s]	Caudal suficiencia temperatura [kg/s]
enero	$\geq 0,57$	$\leq 1,05$
febrero	$\geq 0,57$	$\leq 1,05$
marzo	$\geq 0,57$	$\leq 1,05$
abril	$\geq 0,62$	$\leq 1,07$
mayo	$\geq 0,76$	$\leq 1,07$
junio	$\geq 0,99$	$\leq 0,71$
julio	$\geq 0,84$	$\leq 0,87$
agosto	$\geq 0,79$	$\leq 1,07$
septiembre	$\geq 0,70$	$\leq 1,05$
octubre	$\geq 0,62$	$\leq 1,05$
noviembre	$\geq 0,57$	$\leq 1,05$
diciembre	$\geq 0,57$	$\leq 1,05$

Una vez más se graficaron los caudales para facilitar su entendimiento (Figura 6.3). Podemos observar que en realidad el único mes del año durante el cual no es posible abastecer la demanda energética y cumplir con la temperatura deseada en la red de distribución es junio. Esto implica que solamente durante el mes de junio se deberá utilizar gas para poder aumentar el rendimiento del pozo.

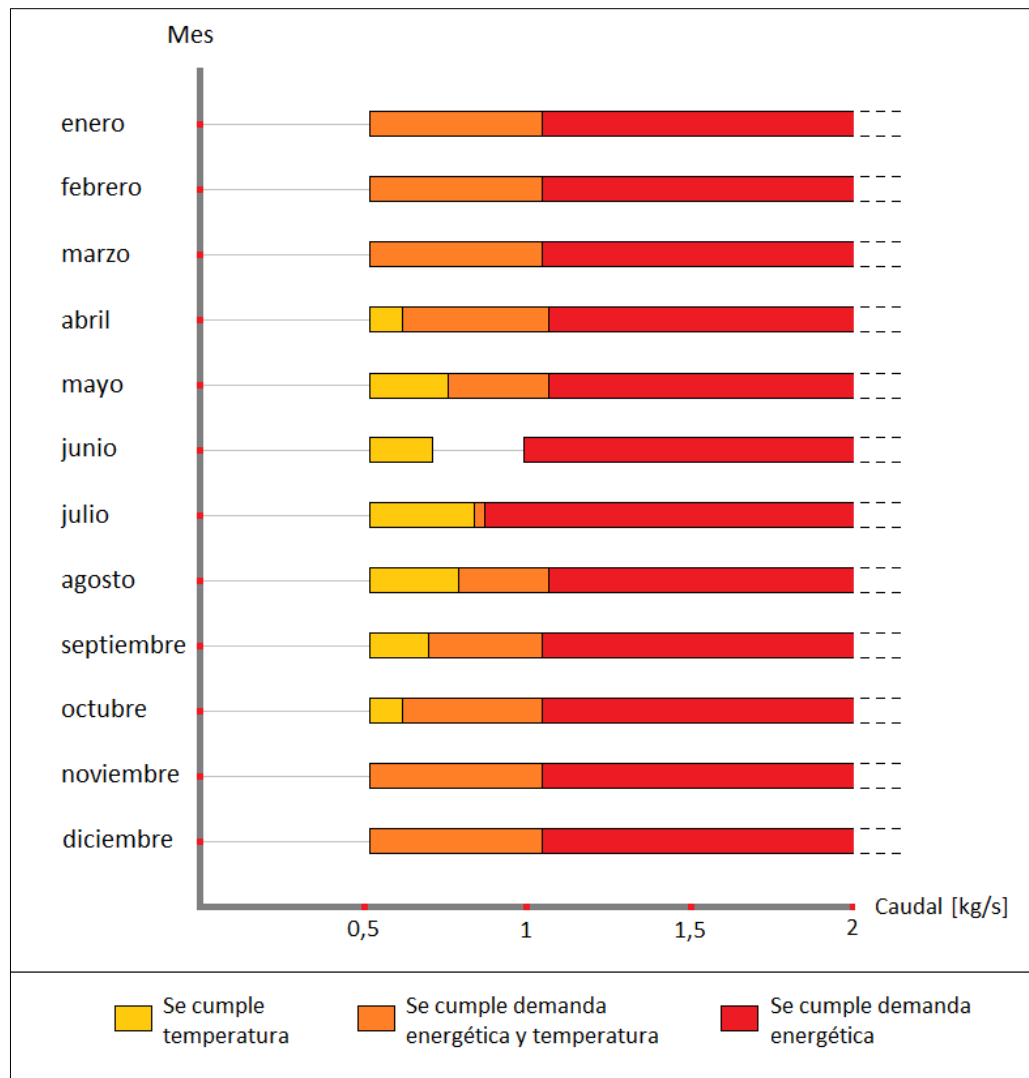


Figura 6.3: Rendimientos del pozo CHULENGO 1 según el caudal para los 12 meses del año. Se puede observar que el único periodo donde no es posible satisfacer la temperatura requerida y la demanda energética de manera simultánea es durante el mes de junio. Adicionalmente, caudales inferiores a 0,57 [kg/s] inducen al fluido a abandonar el estado turbulento por lo que no son factibles y por ende no son graficados.

6.5.2 Consumo de gas con 5 [°C] adicionales

Como se mencionó anteriormente, junio es el único mes donde el pozo presenta déficit. Es por lo tanto necesario recurrir al consumo de gas para aumentar su rendimiento. Si durante este mes se fija el caudal de tal manera que se obtengan los 85 [°C] que son requeridos por la red de distribución se obtienen 182.630 [kWh/mes]. Considerando que la demanda mensual para Punta Delgada durante este periodo es de 230.450 [kWh/mes], entonces se tiene un déficit de 47.820 [kWh/mes]. Un metro cúbico de gas natural equivale a 10,28 [kWh] por lo que se necesitan 4652 [m³] de gas natural para poder suplir el déficit.

La demanda energética anual total de Punta Delgada es 1.932.986 [kWh/año] (ver apartado 4.3.2) lo que equivale a 188.034 [m³] de gas natural. Por lo tanto, considerando el déficit de junio, el pozo CHULENGO 1 sería capaz de abastecer en un 97,53% la demanda energética anual asociada a la calefacción de espacios para el poblado de Punta Delgada.

6.5.3 Rendimiento mensual con 10 [°C] adicionales

A continuación se analiza en detalle el rendimiento del pozo CHULENGO 1 considerando un intercambiador de calor tal que se necesitan 10 [°C] adicionales para que la transferencia de calor del pozo a la red de distribución sea efectiva. En la Tabla 6.5 podemos encontrar la temperatura de salida necesaria, la temperatura de entrada y la demanda energética para cada mes.

Tabla 6.5: Temperatura necesaria en la salida del pozo considerando 10 [°C] adicionales, temperatura de entrada al pozo y demanda energética para cada mes del año.

Mes	Temperatura requerida [°C]	Temperatura entrada [°C]	Demanda energética [kWh/mes]
enero	80	40	112.919
febrero	80	40	103.991
marzo	80	40	128.517
abril	80	45	164.602
mayo	80	45	189.610
junio	90	50	230.450
julio	85	45	204.521
agosto	80	45	196.055
septiembre	80	40	179.773
octubre	80	40	163.906
noviembre	80	40	133.825
diciembre	80	40	124.817

En base a estos parámetros se obtuvieron los siguientes caudales:

Tabla 6.6: Caudales necesarios según el mes para el pozo CHULENGO 1 considerando 10 [°C] adicionales. En la columna izquierda se tiene el caudal necesario para alcanzar la demanda energética mientras que en la columna derecha los caudales necesarios para alcanzar la temperatura requerida.

Mes	Caudal suficiencia energética [kg/s]	Caudal suficiencia temperatura [kg/s]
enero	$\geq 0,57$	$\leq 0,86$
febrero	$\geq 0,57$	$\leq 0,86$
marzo	$\geq 0,57$	$\leq 0,86$
abril	$\geq 0,62$	$\leq 0,87$
mayo	$\geq 0,76$	$\leq 0,87$
junio	$\geq 0,99$	$\leq 0,57$
julio	$\geq 0,84$	$\leq 0,71$
agosto	$\geq 0,79$	$\leq 0,87$
septiembre	$\geq 0,70$	$\leq 0,86$
octubre	$\geq 0,62$	$\leq 0,86$
noviembre	$\geq 0,57$	$\leq 0,86$
diciembre	$\geq 0,57$	$\leq 0,86$

A diferencia del caso anterior, en donde se consideraron 5 [°C] adicionales, este caso presenta dos meses, junio y julio, durante los cuales no se puede abastecer tanto la demanda térmica como la demanda de temperatura de manera simultánea (Figura 6.4).

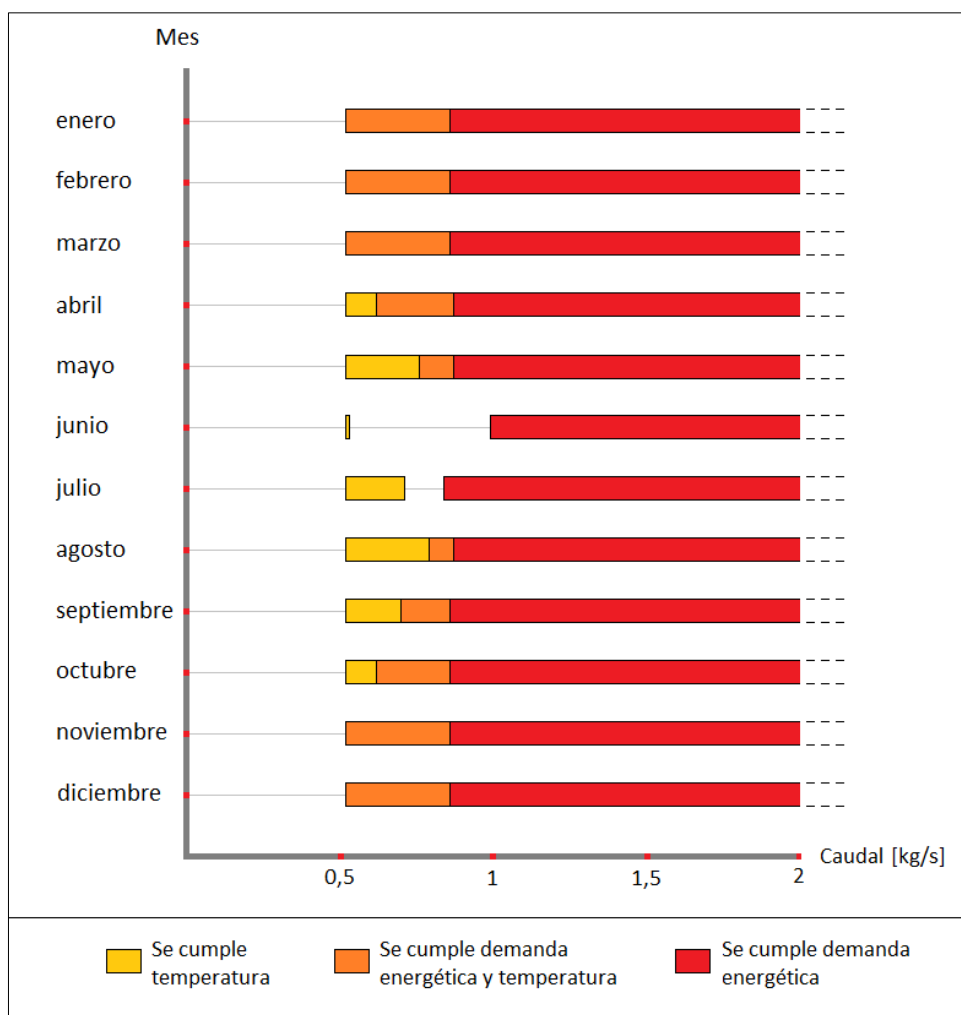


Figura 6.4: Rendimientos del pozo CHULENGO 1 según el caudal para los 12 meses del año. Se puede observar que el solamente durante junio y julio no es posible satisfacer la temperatura requerida y la demanda energética de manera simultánea. Adicionalmente, caudales inferiores a 0,57 [kg/s] inducen al fluido a abandonar el estado turbulento por lo que no son factibles y por ende no son graficados.

6.5.4 Consumo de gas con 10 [°C] adicionales

Si durante el mes de junio se fija el caudal de manera tal que se obtengan 90 [°C], entonces la energía mensual extraíble del pozo es igual a 155.423 [kWh/mes]. Considerando que durante este mes la demanda es de 230.450 [kWh/mes], se tiene un déficit de 75.027 [kWh/mes]. Por otro lado, si para el mes de julio se fija el caudal para obtener los 85 [°C] necesarios entonces se obtienen 182.247 [kWh/mes]. Una vez más, considerando que la demanda durante este mes es de 204.521 [kWh/mes] se tiene un déficit de 22.274 [kWh/mes]. Al sumar ambos se obtiene un déficit total de 97.301 [kWh/mes].

Siguiendo el mismo procedimiento llevado a cabo en el apartado 6.5.2, se obtiene que será necesario utilizar 9465 [m³] de gas natural para suplir el déficit. Esto implica que el pozo CHULENGO 1 sería capaz de abastecer en un 94,97% la demanda energética anual asociada a la calefacción de espacios para el poblado de Punta Delgada.

CAPITULO 7. DISCUSIONES

7.1 Análisis de la metodología

7.1.1 Distancia de los pozos preseleccionados

Para la selección preliminar de los pozos se tomaron solamente aquellos que se encuentran a menos de 7 kilómetros de Punta Delgada. Esta distancia, escogida de manera arbitraria, es exagerada y fue fijada así para abarcar un mayor número de pozos y de esa manera tener una comprensión mejor la situación en los alrededores del poblado. Sin embargo, distancias elevadas suponen mayores costos, mayores pérdidas de temperatura y mayores dificultades técnicas con respecto a la instalación por lo que no es práctico rehabilitar pozos tan lejanos. Para efectos de este trabajo faltan datos en cuanto a las pérdidas de calor que puedan sufrir las tuberías y de los costos de estas por lo que no se maneja realmente una distancia máxima posible. Aun así, es razonable pensar que distancias mayores a 2 kilómetros suponen una dificultad técnica que es preferible evitar, sobre todo en una zona remota como lo es Punta Delgada. De hecho, en los casos de calefacción distrital con geotermia, las centrales de calor están en la ciudad (e.g. centrales de Munich), es decir, lo ideal es que estén en el pueblo. Este es el principal motivo por el cual se escogió el pozo CHULENGO 1 y no NIKA3.

7.1.2 Perfil de temperatura

Para obtener los gradientes geotermiales de los pozos analizados se ocupó, por lo general, una medida de temperatura tomada en el fondo del pozo. Gracias a esta y conociendo la profundidad a la que fue tomada esta medición se calculó un gradiente geotermal. Esto implica que se considera que la temperatura del suelo en superficie es de 0 [°C] y comienza a ascender de manera lineal a medida que se desciende por la corteza. Debido a que el fluido calo-portador está a mayor temperatura que la roca circundante en estos primeros metros, se produce una pérdida de calor (Figura 7.1).

Sin embargo, es bien sabido que los suelos presentan un mayor o menor grado de inercia térmica dependiendo de las características del suelo. Si bien la temperatura ambiente puede ser de 0 [°C] o menor, el suelo retiene el calor que ha recibido por radiación solar. Esto implica que probablemente la temperatura del suelo en los primeros metros no sea tan baja como la estimada en este trabajo y por ende las pérdidas de calor que sufre el pozo en los primeros metros sean parcialmente reducidas.

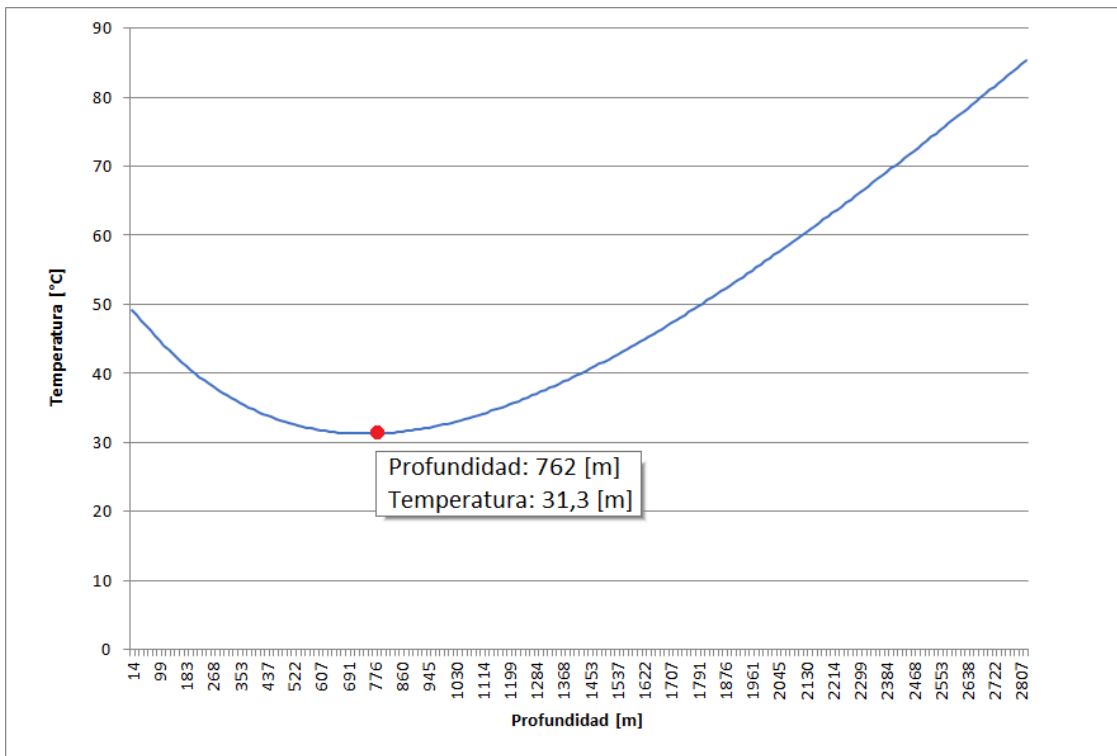


Figura 7.1: Cambio de temperatura del fluido descendente en el pozo CHULENGO 1. El punto rojo representa la profundidad a partir de la cual la temperatura del fluido comienza subir. Corresponde a una temperatura de 31,3 [°C] y una profundidad de 762 [m].

7.1.3 Temperatura de entrada

La temperatura de entrada que se ingresó para los distintos pozos analizados fue fijada como igual a la temperatura que viaja en la tubería de vuelta de la red de distribución (desde el poblado hacia el pozo). Esta temperatura a su vez queda determinada según la Figura 3.5. Sin embargo, esta representa en realidad una temperatura mínima de entrada al pozo ya que, como se mencionó anteriormente, el agua que viaja en la red de distribución no es la misma que circula por el pozo. Para transmitir el calor del agua del pozo a la red de distribución se utiliza un intercambiador de calor y por ende la temperatura real de entrada sería la temperatura del agua del pozo una vez que se le extrajo su calor para calentar al fluido de la red de distribución (Figura 3.6). Debido a que la temperatura del pozo, luego de pasar por el intercambiador, nunca será más baja que la temperatura en la tubería de vuelta, entonces esta última puede ser considerada como un límite inferior para la temperatura de entrada. Por este motivo se consideró que ocupar la temperatura de la tubería de vuelta como la temperatura de entrada es el valor más conservador posible.

7.1.4 Fluidos circulantes en profundidad

Para efectos de este trabajo se consideró que no existen acuíferos en profundidad u otros fluidos que puedan circular alrededor del pozo. La influencia que tienen los fluidos en los poros de las rocas es considerable. Rocas con poros saturados por agua poseen mayor conductividad termal que rocas con poros saturados por aire (Robertson, 1988). Adicionalmente, cuando se tiene agua circulando alrededor del pozo también hay transporte de calor en el entorno del pozo por efecto del flujo de agua subterránea. Esto renueva rápidamente la temperatura en torno al pozo favoreciendo la renovación del recurso geotérmico. Por lo tanto, en caso de existir fluidos en

profundidad la conductividad termal de las rocas sería mayor, aumentando el rendimiento del pozo.

7.1.5 Estado de los pozos

Una vez realizada la pre-selección de los pozos, utilizando para ello los pozos ubicados a menos de 7 kilómetros de Punta Delgada, se procedió a descartar todos aquellos pozos que se encontraran en operación. De esta manera se dejaron solamente los pozos en estado de abandono, los cuales están catalogados en la base de datos de la ENAP con distintos tipos de estado. Debido a que se empleó el caso de Punta Delgada solo como un ejemplo de la metodología y debido a la falta de información con respecto al estado real de estos pozos, se consideró que todos ellos están en condiciones para ser rehabilitados. En caso de que se busque seguir con este proyecto para la localidad en cuestión, se deberá analizar en detalle el estado de cada uno de los pozos.

7.2 Análisis de sensibilidad de la herramienta analítica

Con el fin de poder comprender mejor como varia el potencial energético extraíble de cada pozo según las características de este, se modeló un pozo ficticio al cual se le hicieron variaciones en sus medidas de manera tal que fuese posible cuantificar el impacto que tiene cada una de ellas en los resultados. Esto permite que sea posible tener una idea general del rendimiento de un pozo solo conociendo sus características.

Para que el pozo ficticio fuese lo más parecido posible a pozos reales, se decidió diseñar este en base al promedio de diversos pozos ubicados en los alrededores de Punta Delgada. Para ello se tomaron todos los pozos que se encuentran a menos de 10 kilómetros de distancia del poblado, resultando ser un total de 31. A partir de ellos se pudo obtener valores promedio para algunos parámetros (Tabla 7.1). Cabe destacar que el caudal, el radio interior y la conductividad de la roca fueron escogidos de manera semi-arbitraria (ver apartados 4.2.1 y 6.3.1) mientras que el largo, el radio y el gradiente son datos inherentes al pozo.

Tabla 7.1: Valores promedio de los 31 pozos encontrados a menos de 10 kilómetros de Punta Delgada. La segunda fila muestra estos mismos valores con un aumento del 20%.

	Largo [m]	Radio exterior [m]	Radio interior [m]	Gradiente [°C/m]	Conductividad roca [W/mK]	Caudal [kg/s]
Promedio	2837	0,147	0,07	0,043	2,3	1
+20%	3404	0,1764	0,084	0,0516	2,76	1,2

A cada parámetro se le sumó un 20% de su valor promedio y luego se obtuvo la temperatura y potencia extraíble para cada caso de manera independiente. De esta forma se generaron los siguientes resultados:

Tabla 7.2: Resultados del análisis de sensibilidad para distintos parámetros. Las cifras en verde indican aumentos mientras que aquellas en rojo indican disminuciones.

	Temperatura [°C]	Variación	Potencia [kW]	Variación
Promedio	85,00	0%	356,13	0%
Largo +20%	107,2	26,12	449,14	26,12
Radio +20%	89,6	5,41	375,35	5,39
Radio interior +20%	84,93	0,08	355,85	0,08
Gradiente +20%	101,4	19,29	424,98	19,33
Conductividad roca +20%	89,55	5,35	375,23	5,36
Caudal +20%	80,48	5,32	404,68	13,63

A primera vista los parámetros que mayor incidencia tienen en los resultados son el largo del pozo y el gradiente. Todos los demás parecen afectar considerablemente menos al potencial energético de los pozos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que una variación del 20% en el largo del pozo es bastante alta, a tal punto que de los 31 pozos que se consideraron para este análisis, ninguno supera los 3200 metros de largo y un aumento del 20% supone un pozo de 3404 metros. Algo similar ocurre con el gradiente, donde solamente dos pozos superan los 0,05 [°C/m]. Por otro lado, un incremento del 20% es algo que puede ocurrir fácilmente a parámetros como la conductividad de la roca. Esta puede duplicarse o inclusive triplicarse para cualquier tipo de litología (Clauser & Huenges, 1995).

Considerando lo recién expuesto y agregando que ciertas medidas como la conductividad de la roca o el caudal son parámetros que el usuario debe aportar, se sugiere que se tenga extrema precaución al momento de decidir estos valores. La conductividad de la roca sobre todo no es un parámetro fácil de predecir ya que depende en gran medida de su nivel de saturación, compactación, granulometría, temperatura ambiente, entre otros (ver apartado 4.4).

7.3 Limitaciones del modelo

7.3.1 Radio de influencia térmico del pozo

Algunos de los autores que han modelado antiguos pozos petroleros como intercambiadores de calor verticales cerrados ocuparon para sus modelos el método de volúmenes finitos y también incorporaron la variable del tiempo (Bu et al., 2012; Caulk & Tomac; 2017). Gracias a esto es posible discretizar el espacio, es decir, ver como evoluciona cada porción de roca o pozo considerada y analizar su evolución en el tiempo. Si bien estos métodos permiten obtener resultados más precisos, usualmente el desarrollo de estos involucra softwares que requieren una licencia para ser utilizados y/o son más complejos. La idea fundamental de este trabajo es la de entregar una herramienta de fácil acceso o uso, en este caso una hoja de cálculo, que sea capaz de entregar una primera aproximación a los valores que se espera encontrar. Por este motivo el modelo bajo el cual se llevaron a cabo los cálculos de temperatura y potencia presenta ciertas limitaciones.

Una de las limitaciones que presenta el modelo es que, al no contar con el método de los volúmenes finitos, si se ingresan diámetros de roca constante (D_r , ver apartado 4.2.1) muy altos, la temperatura y potencia extraíble cae abruptamente. Esto incide en que haya grandes diferencias

entre los radios de influencia térmica que pueden tener los pozos elegidos por otros autores y los elegidos acá.

El trabajo en el que fue en gran parte basada la modelación del intercambiador de calor es el de Davis & Michaelides (2009). En el no consideran el coeficiente de transferencia de calor de la roca y por ende tampoco un espesor de roca a partir del cual se está transfiriendo calor hacia el pozo. Dicho de otra manera, en aquel trabajo se considera la transferencia de calor de la roca como perfecta. Debido al evidente sesgo que una premisa de este tipo acarrea, se decidió incorporar estas carencias al modelo aquí presentado.

La manera en la que se añadieron al modelo estos parámetros queda evidenciada en la ecuación 3.2, en la cual podemos ver que el coeficiente de transferencia global entre la roca y la sección exterior del pozo, U_{re} , es directamente proporcional al coeficiente de transferencia de calor de la roca e inversamente proporcional al diámetro de roca constante, D_r . Esto se asemeja a considerar la roca como un material aislante de espesor igual a D_r y conductividad k_r , muy similar a como el material aislante de poliestireno disminuye la pérdida de calor que sufre el fluido al ascender. Es por este motivo que si ingresamos un D_r muy elevado, entonces U_{re} disminuye considerablemente lo que finalmente se traduce en temperaturas mucho más bajas. Si bien este método limita el radio de influencia térmico del pozo, si permite considerar la conductividad térmica de la roca y reduce por lo tanto el sesgo del modelo de Davis & Michaelides (2009).

7.3.2 Pérdida de calor en la sección interior

Como se mencionó en la sección 3.1.1, el fluido ascendente que viaja por la sección interior del pozo pierde calor producto de la diferencia de temperatura que hay con el fluido descendente de la sección exterior. Para efectos de este trabajo, se consideró que todo el calor perdido al subir es sumado al fluido descendente. Esto es una aproximación que se realizó considerando que siempre que la roca este más caliente que el pozo, el pozo como sistema no perderá calor. Si bien durante los primeros metros hay pérdidas (Figura 7.1), estas quedan acotadas solamente a las partes más someras. Además, considerando lo expuesto en la sección 7.1.2, estas pérdidas pueden verse disminuidas.

CAPITULO 8. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones de este trabajo de título:

- De acuerdo a los requerimientos de calefacción de la red distrital y las condiciones de borde del gradiente de temperatura, los pozos tienen que ser capaces de satisfacer tanto la demanda energética del poblado como la temperatura requerida en la red de distribución del sistema distrital. Si alguno de los pozos no es capaz de satisfacer ambos requisitos de manera simultánea, se considera utilizar gas u otra fuente de energía para suplir el déficit.
- El pozo seleccionado en este trabajo como el mejor candidato para climatizar Punta Delgada es CHULENGO 1, el cual se ubica a 660 metros del centro del poblado. Se analizaron dos casos distintos, uno considerando 5 [°C] adicionales y otro considerando 10 [°C] adicionales. En ambos casos los resultados fueron positivos, encontrándose ahorros que representan un 97,53% y un 94,97% del consumo anual total de gas destinado a la climatización de espacios de Punta Delgada. En ambos casos hay meses durante los cuales no es posible satisfacer la demanda térmica y energética de manera simultánea por lo que se propuso suplir el déficit mediante gas debido a los bajos costos de este en la región de Magallanes.
- La rehabilitación de pozos abandonados para explorar y producir hidrocarburos como intercambiadores de calor verticales cerrados coaxiales permite entregar una cantidad de energía significativa (por ejemplo, el 94,97% de la demanda energética térmica asociada a la climatización de espacios de Punta Delgada, para el caso menos favorable, i.e. considerando 10 [°C] en pérdidas de por transferencia de calor). En términos prácticos esto permite reducir el consumo de gas en un 94% para un poblado de más de 80 casas como lo es Punta Delgada.
- El trabajo realizado aquí se puede extender a sitios similares, tales como Cerro Sombrero, donde hay pozos abandonados con gradientes de temperatura similares.

BIBLIOGRAFIA

ASHRAE (2009). Handbook, Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA, USA.

Barwick, J. (1949). The Tertiary Stratigraphy and Structure of North Tierra del Fuego. Corporación de Fomento de la Producción, Chile.

Bergman, T. L., Incropera, F. P., Lavine, A. S., & Dewitt, D. P. (2011). Introduction to heat transfer. John Wiley & Sons.

Biddle, K. T., Uliana, M. A., Mitchum, R. M., Fitzgerald, M. G., & Wright, R. C. (1986). The stratigraphic and structural evolution of the central and eastern Magallanes Basin, southern South America. Foreland basins, 41-61.

Bu, X., Ma, W., & Li, H. (2012). Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells. Renewable energy, 41, 80-85.

Bustamante W., Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) y Programa País de Eficiencia Energética (PPEE) (2009). Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social.

Caulk, R. A., & Tomac, I. (2017). Reuse of abandoned oil and gas wells for geothermal energy production. Renewable Energy, 112, 388-397.

Clauser, C., & Huenges, E. (1995). Thermal conductivity of rocks and minerals. Rock physics & phase relations: a handbook of physical constants, 105-126.

Corbella, H., Chelotti, L., & Pomposiello, C. (1996). Neotectonica del rift Jurasico austral en Pali Aike, Patagonia Extrandina, Santa Cruz, Argentina. In XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Buenos Aires, Actas VII (pp. 383-393).

Corbella, H. (1999). Dataciones radimétricas en Pali Aike, Patagonia austral. In Actas del XIV Congreso Geológico Argentino (Vol. 2, pp. 265-citation_lastpage).

Davis, A. P., & Michaelides, E. E. (2009). Geothermal power production from abandoned oil wells. Energy, 34(7), 866-872.

D'Orazio, M., Agostini, S., Mazzarini, F., Innocenti, F., Manetti, P., Haller, M. J., & Lahsen, A. (2000). The Pali Aike volcanic field, Patagonia: slab-window magmatism near the tip of South America. Tectonophysics, 321(4), 407-427.

González, E. (1953). Estratigrafía y distribución de los grupos El Salto y Palomares en gran parte de la cuenca de Magallanes. Informe Archivo Técnico ENAP, Santiago. (Inédito).

González, E. (1965). La Cuenca Petrolífera de Magallanes. Revista Minerales, Instituto de Ingenieros de Minas, Vol. 91: 1-15, Santiago.

Gust, D. A., Biddle, K. T., Phelps, D. W., & Uliana, M. A. (1985). Associated Middle to Late Jurassic volcanism and extension in southern South America. Tectonophysics, 116(3-4), 223-253.

- Hauser, A. (1964). La zona glauconítica en la plataforma Springhill, Magallanes, Chile (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Chile.
- Keidel, I. y Hemmer, A. (1931). Informe preliminar sobre las investigaciones efectuadas en la región petrolífera de Magallanes en los meses de verano de 1928-1929 (12-XII-1929). Boletín minero, Sociedad Nacional de Minería, Santiago, año 47, Vol. 48. N° 388: 706-717.
- Kniker, H. T. (1949). Present information regarding ages of the Tertiary formations of Magallanes province, ENAP, Santiago, Chile.
- Kujawa, T., Nowak, W., & Stachel, A. A. (2006). Utilization of existing deep geological wells for acquisitions of geothermal energy. *Energy*, 31(5), 650-664.
- Lagarigue, S. C., Elgueta, S., Arancibia, G., Morata, D., Sanchez, J., & Rojas, L. (2017, December). The Springhill Formation (Jurassic-Cretaceous) as a potential low enthalpy geothermal reservoir in the Cerro Sombrero area, Magallanes Basin, Chile. In AGU Fall Meeting Abstracts.
- Lesla, P. J. & Ferello, R. (1972) Región Extraandina de Chubut y Norte de Santa Cruz In: Geología Regional Argentina (Ed. By A. F. Leanza), pp. 601-653. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba.
- Linares, E., González, R. R., & Argentina, A. G. (1989). Catálogo de edades radiométricas de la República Argentina, años 1957-1987. Asociación Geológica Argentina. Malumian, N., Hromic T. & Nanez, C. (2013). El Paleógeno de la cuenca de Magallanes: bioestratigrafía y discontinuidades. *Anales Instituto Patagonia (Chile)*, 2013. 41(1):29-52 29
- Mazzarini, F., & D'Orazio, M. (2003). Spatial distribution of cones and satellite-detected lineaments in the Pali Aike Volcanic Field (southernmost Patagonia): insights into the tectonic setting of a Neogene rift system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 125(3), 291-305.
- Mercer, J. H. (1976). Glacial history of Southernmost South America 1. Quaternary research, 6(2), 125-166.
- Mordojovich, C. (1948). Descripción de Testigos Informe Técnico ENAP (inédito), Santiago.
- Mordojovich, C. (1951). Informe preliminar sobre los levantamientos geológicos de la costa Sur de Tierra del Fuego. Informe Inédito, Archivo Técnico, ENAP.
- Mpodosis, C., Mella, P., & Pavda, D. (2011). Estratigrafía y megasecuencias sedimentarias en la cuenca Austral-Magallanes, Argentina y Chile. In VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (Vol. 35).
- Natland, M., Gonzalez, E., Cañon, A. y Ernst, M. (1974). A system of stages for correlation of Magallanes basin sediments. *The Geological Society of America, Memoir 139*: 1-26.
- Ortega, B. (2017). Evaluación de un sistema de climatización con bomba de calor geotérmica para una casa representativa en distintos climas de Chile (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago, Chile.

- Pettersen, T. D. (1994). Variation of energy consumption in dwellings due to climate, building and inhabitants. *Energy and buildings*, 21(3), 209-218.
- Recknagel, H., Sprenger, E., & Schramek, E.-R. (2009). *Taschenbuch für Heizung & Klimatechnik*. (E.-R. Schramek, Editor) (74th ed.). München: Oldenbourg Industrieverlag München.
- Robertson, E. C. (1988). Thermal properties of rocks (No. 88-441). US Geological Survey,.
- Ross, P. S., Delpit, S., Haller, M. J., Németh, K., & Corbella, H. (2011). Influence of the substrate on maar–diatreme volcanoes—an example of a mixed setting from the Pali Aike volcanic field, Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201(1-4), 253-271.
- Saéz, M. (2017). Análisis sismoestratográfico del cenozoico en sector norte de isla grande de Tierra del Fuego: Cuenca de Magallanes: integración de datos de subsuelo y afloramientos (tesis de pregrado). Unuversidad de Chile, Santiago, Chile.
- Singer, B., Vincze, Y., Ton-That, T., Rabassa, J. O., Roig, C., & Brunstäd, K. A. (1997). Timescales of late Cenozoic climate change in the southern hemisphere from ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of Patagonian lavas.
- Thomas, C. R. (1949). Manantiales field, Magallanes Province, Chile. *AAPG Bulletin*, 33(9), 1579-1589.
- Valtinke, S. (2016). A district heating system for Puyuhuapi, powered by geothermal energy (master thesis). Bochum University of Applied Sciences, Bochum, Germany.
- Wang, S., Yan, J., Li, F., Hu, J., & Li, K. (2016). Exploitation and utilization of oilfield geothermal resources in China. *Energies*, 9(10), 798.
- Wight, N. M., & Bennett, N. S. (2015). Geothermal energy from abandoned oil and gas wells using water in combination with a closed wellbore. *Applied Thermal Engineering*, 89, 908-915.
- Zoth, G., & Haenel, R. (1988). Appendix. In *Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination* (pp. 449-468). Springer, Dordrecht.

ANEXOS

ANEXO A: ENTRADAS HOJA DE CÁLCULO

ENTRADA DE DATOS		
temperatura entrada, T1	50	°C
radio interior, r	0,07	m
radio exterior, R	0,122	m
espesor aislante, t	0,0254	m
caudal, \dot{m}	0,57	kg/s
densidad fluido promedio, ρ	980,53	kg/m ³
conductividad roca promedio, k_r	2,3	W/m*K
conductividad fluido promedio, k_f	0,6	W/m*K
conductividad aislante, k_a	0,027	W/m*K
diametro roca constante, D_r	0,5	m
viscosidad dinamica fluido promedio, μ	0,000432	Pa*s
temperatura roca, T_r	117	°C
profundidad medición de temperatura	2819	m
profundidad pozo	2821	m
Prandtl promedio, Pr	2,6	
calor específico fluido, C_p	4190	J/kg*K

Anexo A.1: Entrada de datos para el pozo CHULENGO 1.

ENTRADA DE DATOS	
temperatura entrada, T1	50 °C
radio interior, r	0,07 m
radio exterior, R	0,122 m
espesor aislante, t	0,0254 m
caudal, m	0,90 kg/s
densidad fluido promedio, ρ	980,53 kg/m ³
conductividad roca promedio, k_r	2,3 W/m*K
conductividad fluido promedio, k_f	0,6 W/m*K
conductividad aislante, k_a	0,027 W/m*K
diámetro roca constante, Dr	0,5 m
viscosidad dinamica fluido promedio, μ	0,000432 Pa*s
temperatura roca, Tr	106 °C
profundidad medición de temperatura	2752 m
profundidad pozo	2752 m
Prandtl promedio, Pr	2,6
calor específico fluido, Cp	4190 J/kg*K

Anexo A.2: Entrada de datos para el pozo GUANACO 1.

ENTRADA DE DATOS	
temperatura entrada, T1	50 °C
radio interior, r	0,07 m
radio exterior, R	0,122 m
espesor aislante, t	0,0254 m
caudal, m	0,90 kg/s
densidad fluido promedio, ρ	980,53 kg/m ³
conductividad roca promedio, k_r	2,3 W/m*K
conductividad fluido promedio, k_f	0,6 W/m*K
conductividad aislante, k_a	0,027 W/m*K
diámetro roca constante, Dr	0,5 m
viscosidad dinamica fluido promedio, μ	0,000432 Pa*s
temperatura roca, Tr	108 °C
profundidad medición de temperatura	2695 m
profundidad pozo	2697 m
Prandtl promedio, Pr	2,6
calor específico fluido, Cp	4190 J/kg*K

Anexo A.3: Entrada de datos para el pozo GUANACO 2.

ENTRADA DE DATOS		
temperatura entrada, T1	50	°C
radio interior, r	0,07	m
radio exterior, R	0,169	m
espesor aislante, t	0,0254	m
caudal, \dot{m}	0,93	kg/s
densidad fluido promedio, ρ	980,53	kg/m ³
conductividad roca promedio, k_r	2,3	W/m*K
conductividad fluido promedio, k_f	0,6	W/m*K
conductividad aislante, k_a	0,027	W/m*K
diametro roca constante, Dr	0,5	m
viscosidad dinamica fluido promedio, μ	0,000432	Pa*s
temperatura roca, Tr	112	°C
profundidad medición de temperatura	2537	m
profundidad pozo	2538	m
Prandtl promedio, Pr	2,6	
calor específico fluido, Cp	4190	J/kg*K

Anexo A.4: Entrada de datos para el pozo MERIC 1.

ENTRADA DE DATOS		
temperatura entrada, T1	50	°C
radio interior, r	0,07	m
radio exterior, R	0,169	m
espesor aislante, t	0,0254	m
caudal, \dot{m}	0,90	kg/s
densidad fluido promedio, ρ	980,53	kg/m ³
conductividad roca promedio, k_r	2,3	W/m*K
conductividad fluido promedio, k_f	0,6	W/m*K
conductividad aislante, k_a	0,027	W/m*K
diametro roca constante, Dr	0,5	m
viscosidad dinamica fluido promedio, μ	0,000432	Pa*s
temperatura roca, Tr	107	°C
profundidad medición de temperatura	2550	m
profundidad pozo	2550	m
Prandtl promedio, Pr	2,6	
calor específico fluido, Cp	4190	J/kg*K

Anexo A.5: Entrada de datos para el pozo MERIC 2.

ENTRADA DE DATOS	
temperatura entrada, T1	50 °C
radio interior, r	0,07 m
radio exterior, R	0,173 m
espesor aislante, t	0,0254 m
caudal, \dot{m}	1,90 kg/s
densidad fluido promedio, ρ	980,53 kg/m ³
conductividad roca promedio, k_r	2,3 W/m*K
conductividad fluido promedio, k_f	0,6 W/m*K
conductividad aislante, k_a	0,027 W/m*K
diametro roca constante, Dr	0,5 m
viscosidad dinamica fluido promedio, μ	0,000432 Pa*s
temperatura roca, Tr	138 °C
profundidad medición de temperatura	3155 m
profundidad pozo	3156 m
Prandtl promedio, Pr	2,6
calor específico fluido, Cp	4190 J/kg*K

Anexo A.6: Entrada de datos para el pozo NIKA 2.

ENTRADA DE DATOS	
temperatura entrada, T1	50 °C
radio interior, r	0,07 m
radio exterior, R	0,137 m
espesor aislante, t	0,0254 m
caudal, \dot{m}	1,12 kg/s
densidad fluido promedio, ρ	980,53 kg/m ³
conductividad roca promedio, k_r	2,3 W/m*K
conductividad fluido promedio, k_f	0,6 W/m*K
conductividad aislante, k_a	0,027 W/m*K
diametro roca constante, Dr	0,5 m
viscosidad dinamica fluido promedio, μ	0,000432 Pa*s
temperatura roca, Tr	128 °C
profundidad medición de temperatura	2920 m
profundidad pozo	2923 m
Prandtl promedio, Pr	2,6
calor específico fluido, Cp	4190 J/kg*K

Anexo A.7: Entrada de datos para el pozo NIKA 3.

ANEXO B: BASE DE DATOS

POZO	TEMPERATURA REGISTRADA [°C]	TIEMPO DESDE CIRCULACIÓN [HRS]	CORRECCION SIMPLE [°C]	CORRECCION +18
NIKA OESTE 1	92	3,5	116	110
	103	2	128	121
NIKA OESTE 2	104	3	128	122
NIKA SUR 1	116	2	141	134
	96	3	120	114
PAMPA LARGA 2	94	2	119	112
PAMPA LARGA 3	99	3	123	117
PAMPA LARGA 4	93	5	116	111
PAMPA LARGA 5	120	2	145	138
PAMPA LARGA 6	110	3	134	128
PAMPA LARGA 7	129	3	153	147
PAMPA LARGA 8	129	3	153	147
PAMPA LARGA 9	124	3	148	142
PAMPA LARGA 10	129	3	153	147
	129	3	153	147
PAMPA LARGA 10-A	DESC	DESC	DESC	DESC
PAMPA LARGA 10-B	102	3	126	120
PAMPA LARGA 11	DESC	DESC	DESC	DESC
PUNTA DELGADA NORTE 1	87	2	112	105
PUNTA DELGADA NORTE 2	86	3	110	104
	38	2	63	56
	88	2,5	113	106
PUNTA DELGADA NORTE 3	68	2,5	93	86
MUNICION 1	104	2	129	122
MUNICION 2	104	6	126	122
MUNICION 3	94	5	119	112
	96	3	120	114
	87	5	110	105
MUNICION OESTE 1	81	3,66	105	99
NIKA 1	82	3,5	106	100
	93	DESC	DESC	111
	72	4	95	90

Anexo B.1: Base de datos para los 23 pozos restantes utilizados en el análisis de sensibilidad de la hoja de cálculo. Parte I.

POZO	PROFUNDIDAD MEDICION [m]	GRADIENTE [°C/m]	GRADIENTE PROMEDIO [°C/m]
NIKA OESTE 1	2949	0,0373	0,0389
	2989	0,0405	
NIKA OESTE 2	3001	0,0407	0,0407
NIKA SUR 1	2929	0,0457	0,0431
	2820	0,0404	
PAMPA LARGA 2	2933	0,0382	0,0382
PAMPA LARGA 3	2888	0,0405	0,0405
PAMPA LARGA 4	3019	0,0368	0,0368
PAMPA LARGA 5	3079	0,0448	0,0448
PAMPA LARGA 6	3041	0,0421	0,0421
PAMPA LARGA 7	2965	0,0496	0,0496
PAMPA LARGA 8	3012	0,0488	0,0488
PAMPA LARGA 9	2982	0,0476	0,0476
PAMPA LARGA 10	2988	0,0492	0,0495
	2949	0,0498	
PAMPA LARGA 10-A	DESC	DESC	DESC
PAMPA LARGA 10-B	3077	0,0390	0,039
PAMPA LARGA 11	DESC	DESC	DESC
PUNTA DELGADA NORTE 1	2507	0,0447	0,0447
PUNTA DELGADA NORTE 2	2462	0,0422	0,0500
	870	0,0644	
	2447	0,0433	
PUNTA DELGADA NORTE 3	2102	0,0409	0,0409
MUNICION 1	2507	0,0515	0,0515
MUNICION 2	2610	0,0467	0,0467
MUNICION 3	2465	0,0454	0,0445
	2482	0,0459	
	2481	0,0423	
MUNICION OESTE 1	2760	0,0380	0,038
NIKA 1	2896	0,0345	0,0346
	2896	0,0383	
	2896	0,0311	

Anexo B.2: Base de datos para los 23 pozos restantes utilizados en el análisis de sensibilidad de la hoja de cálculo. Parte II.

POZO	LARGO POZO [m]	RADIO EXTERIOR [m]	ESTADO	COORDENADA E	COORDENADA S
NIKA OESTE 1	2991	0,176	productor petroleo	444512	4199575
NIKA OESTE 2	3002	0,137	cerrado descartado	444507	4201555
NIKA SUR 1	2931	0,122	productor petroleo	446601	4198019
PAMPA LARGA 2	2935	0,169	productor gas	449535	4210110
PAMPA LARGA 3	2891	0,169	productor gas	450050	4208792
PAMPA LARGA 4	3021	0,169	cerrado descartado	448036	4209657
PAMPA LARGA 5	3079	0,122	cerrado descartado	450057	4211540
PAMPA LARGA 6	3045	0,137	productor petroleo	450854	4209989
PAMPA LARGA 7	2965	0,137	productor petroleo	449162	4209229
PAMPA LARGA 8	3015	0,137	productor petroleo	449349	4211053
PAMPA LARGA 9	2987	0,137	productor petroleo	449119	4208520
PAMPA LARGA 10	2996	0,137	cerrado descartado	448882	4210474
PAMPA LARGA 10-A	DESC	DESC	productor petroleo	448882	4210474
PAMPA LARGA 10-B	3087	DESC	productor petroleo	448882	4210474
PAMPA LARGA 11	DESC	DESC	cerrado ind. hidroc.	449450	4210688
PUNTA DELGADA NORTE 1	2511	0,169	cerrado ind. hidroc.	460491	4198376
PUNTA DELGADA NORTE 2	2477	0,137	cerrado ind. hidroc.	459442	4199542
PUNTA DELGADA NORTE 3	DESC	0,169	cerrado ind. hidroc.	460002	4199033
MUNICION 1	2508	0,169	cerrado descartado	465833	4207379
MUNICION 2	2611	0,122	cerrado ind. hidroc.	461823	4203110
MUNICION 3	2485	0,122	cerrado descartado	466988	4205037
MUNICION OESTE 1	2761	0,169	productor petroleo	460514	4205383
NIKA 1	2897	0,169	productor gas	448537	4202871

Anexo B.3: Base de datos para los 23 pozos restantes utilizados en el análisis de sensibilidad de la hoja de cálculo. Parte III.